



Universitat
de les Illes Balears



GRUPO DE TECNOLOGÍAS
DE LA INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Actas del XX CONGRESO DE TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Tecnologías de la Información
Geográfica para la construcción de
Territorios Inteligentes



EDITORES
Mauricio Ruiz Pérez
Antoni Pons Esteva

Departament de Geografia
Universitat de les Illes Balears

Palma (Mallorca, Illes Balears)
14-16 octubre 2024

Créditos

© Editores:

Mauricio Ruiz Pérez
Antoni Pons Esteva

© De los textos y las imágenes, sus autores

© Departament de Geografia
Universitat de les Illes Balears
Cra. de Valldemossa, km 7,5. 07122 Palma (Illes Balears)

ISBN: 978-84-128925-7-4

Año de edición: 2024

URL: <https://age-geografia.es/site/publicaciones/tig/2024/lc.pdf>

DOI: <https://doi.org/10.21138/tig.2024.lc>

Prólogo

Es un honor para nosotros presentar las actas del **XX Congreso de Tecnologías de la Información Geográfica (TIG)** del grupo TIG de la **Asociación de Geografía Española (AGE)**, celebrado del 14 al 16 de octubre de 2024 en la **Universitat de les Illes Balears (UIB)**, en Palma de Mallorca. Este congreso marca un importante hito en la evolución de los encuentros de TIG, que desde 1983 han mostrado la transformación de los métodos cuantitativos y de las Tecnologías de la Información Geográfica, subrayando su creciente relevancia en la geografía contemporánea y su impacto en la sociedad.

Este evento ha reunido a más de **70 investigadores** de **25 universidades e instituciones** de todo el mundo, con la presentación de más de **40 ponencias**.

Queremos resaltar el firme compromiso de la UIB con las TIG, que se remonta a 1990, cuando desde el entonces Departamento Ciencias de la Tierra, organizamos el **IV Congreso de TIG** bajo el título "*Los Sistemas de Información Geográficos y la Toma de Decisiones Territoriales*". Desde entonces, la universidad ha sido pionera en la incorporación de las TIG en sus planes de estudio, destacando en el **Grado de Geografía su módulo instrumental** dedicado a las tecnologías geográficas, con asignaturas especializadas en SIG y teledetección. También es fundamental destacar la creación por parte del Vicerrectorado de Investigación del **Servicio Universitario de Sistemas de Información Geográfica y Teledetección** operativo desde 1990. Este congreso refleja esta sólida tradición de apoyo institucional y compromiso con la innovación en geotecnologías.

Durante las últimas décadas, hemos sido testigos de una profunda transformación en el uso de la cartografía y las tecnologías de análisis espacial. Lo que comenzó como una representación estática ha evolucionado hacia herramientas integradas y dinámicas que incluyen **Sistemas de Información Geográfica (SIG)**, **teledetección**, y **sistemas de posicionamiento global (GPS)**. La incorporación de tecnologías como el **Internet de las Cosas (IoT)**, los **drones (UAV)** y los **microsatélites** ha revolucionado la capacidad de monitorear el territorio y gestionar grandes volúmenes de datos en tiempo real.

En la actualidad, estamos viviendo un avance cualitativo con la llegada de la **inteligencia artificial (IA)**, que está automatizando y optimizando el análisis de datos espaciales. Gracias a estos avances, hoy en día podemos crear **gemelos digitales** que combinan datos en tiempo real con modelos predictivos, mejorando la planificación y gestión territorial. Estos avances son cruciales para abordar problemas globales como el **cambio climático**, el **crecimiento demográfico**, la **congestión turística** y la **despoblación rural**. Este contexto justifica el lema de este congreso: "*Las Tecnologías de la Información Geográfica para la construcción de territorios inteligentes*".

El **XX Congreso TIG** ha estado organizado en cinco grandes grupos de ponencias: **Modelado, Análisis y Representación Espacial**, **Sectores de Aplicación y Uso de TIG**, **Participación Ciudadana y Colaboración en TIG**, **Fundamentos y Herramientas en TIG**, y **Gestión, Infraestructuras y Tecnologías Emergentes en TIG**. Estas ponencias estructuran el índice de este texto, que presenta el conjunto de comunicaciones del congreso. Para facilitar la publicación en revistas o libros, se estableció un máximo de seis páginas por artículo, permitiendo a los autores decidir sobre su posible difusión futura.

Cabe destacar la realización de **tres ponencias magistrales**, que ofrecieron una perspectiva clara sobre el presente y futuro de las TIG. El Dr. **José Ignacio Barredo** reflexionó sobre la era de la sobreinformación en su conferencia "*El rol de los geógrafos en tiempos de conocimiento construido a golpe de tuit*". El Dr. **José Ojeda Zújar** presentó su trabajo sobre la *integración espacial de datos multidimensionales en Andalucía*. Finalmente, el Dr. **Rubén Béjar** ofreció una ponencia centrada en la *ingeniería del software aplicada a la investigación geográfica*, subrayando el papel fundamental del desarrollo de herramientas informáticas para la gestión de grandes volúmenes de datos espaciales.

El congreso también ofreció espacios de discusión a través de **mesas redondas** sobre temas como la **formación superior en TIG** y el **uso de las TIG para el análisis del cambio climático y sus impactos**. Además, se presentaron los **microsatélites** como nuevas fuentes de información geográfica. Estas sesiones brindaron a los asistentes la oportunidad de debatir y colaborar, generando sinergias entre investigadores, estudiantes y profesionales.

El evento incluyó **actividades complementarias**, como visitas guiadas por la ciudad de Palma, que ofrecieron una visión práctica sobre el impacto de la planificación territorial en entornos vulnerables al cambio climático y bajo fuerte presión turística. Esta actividad fue posible gracias al apoyo del Dr. **Luis Escudero**, la Dra. **Maria Sebastián** y el Dr. **Biel Horrach**.

Finalmente, queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a todos los miembros del **Comité Científico del Congreso**, a la **Comisión Permanente del Grupo TIG-AGE**, al **Govern de les Illes Balears**, a los

patrocinadores del congreso, como **ESRI-España, Open-Cosmos y MiraMon**, y a nuestros colegas del **Departamento de Geografía** y del **Servicio de SIG y Teledetección UIB-Congres de la Fundació Universitat Empresa**.

Estas actas no solo representan el nivel científico alcanzado, sino que también constituyen una herramienta esencial para avanzar en el uso de las TIG para la creación de territorios más sostenibles, resilientes y eficientes.

Dr. Maurici Ruiz-Pérez y Dr. Antoni Pons Esteva

Departament de Geografia

Universitat de les Illes Balears

Índice general

Prólogo	1
Índice general	3
Comité organizador	6
Comité Científico	7
1. FUNDAMENTOS Y HERRAMIENTAS EN TIG.....	8
J. Ojeda, A. Prieto, E. Sánchez: Estructuras de teselas regulares y accesibilidad por carretera para el cálculo y geovisualización de indicadores de presión a la costa de Andalucía: población residente y viviendas....	9
A. Casarrubias-Castillo, R.N. Ramos-Bernal, A. Alarcon-Paredes, R. Vázquez-Jiménez, R. Ramírez-Romero: Generación de cartografía de cicatrices de deslizamientos de tierra mediante imágenes satelitales a través del teorema de Bayes.....	16
G. Molina, F. Alonso, F.J. Gomariz, M.C. Valdivieso: Implementación de una Suite para la Publicación de Aplicaciones webmapping mediante Tecnologías Open Source para la Gestión y Análisis de los Datos Geo-Relacionales Reunidos en el Proyecto para la Recuperación del Mar Menor	23
C. Bentué, S. Escolano, N. Quílez, J. A. Salvador, M. Zúñiga: Mapa de las Áreas de Salud y Zonas Básicas de Salud de España.....	30
D. Cocero, M. Gallardo, J. Fernández: 2000-2018: veinte años de transformaciones en los usos del suelo en zonas en despoblación. Los ejemplos de Soria y Teruel.	37
F. Alonso-Sarria, C. Valdivieso-Ros, F.J. Gomariz-Castillo, G. Molina-Pérez: Optimización de hiperparámetros de cuatro métodos de aprendizaje automático de clasificación de imágenes de satélite.	44
2. MODELADO, ANÁLISIS Y REPRESENTACIÓN ESPACIAL	50
F. Gomariz-Castillo, F. Alonso-Sarria, M.C. Valdivieso-Ros, F. Pellicer-Martínez, G. Molina-Pérez: ¿Es posible mejorar los datasets climáticos en malla? Evaluación de los <i>datasets</i> existentes en España y su mejora mediante ensembles multimodelo y Random Forest.....	51
V. Trullenque, A. L. Montealegre, A. Ollero: Análisis de la evolución de los patrones de drenaje del Río Cinca: factores y tendencias desde la época preindustrial a la actualidad	58
I. Pereira, E. García-Meléndez, M. Ferrer-Julià, H. van der Werff, F. van der Meer: Cartografía mediante imágenes PRISMA de la composición mineralógica de la Sierra Minera de Cartagena-La Unión (Murcia, sureste de España)	64
L. Pérez, R. Cajo, J. Elía, A. Ruiz: Diseño de herramientas de visualización y modelado de datos de tráfico para la toma de decisiones informada	70
I. Vallejo, J.M. Camarillo, A. Prieto, J. Ojeda: Espacialización y geovisualización del riesgo a temperaturas altas extremas en Andalucía, mediante la integración en teselas regulares (GRID250) de variables de cambio climático y vulnerabilidad.....	77
A. Pons: Indicadores locales de autocorrelación espacial aplicados al análisis del proceso de regularización del alquiler turístico en Mallorca	84
M.T. Lamelas, R. Hoffrén, J. de la Riva, D. Domingo, A.L. Montealegre, A. García-Martín: Estimación de modelos de combustible con tecnología LiDAR en ambientes mediterráneos	90
J.M. Camarillo, I. Vallejo, J. Ojeda, E. Sánchez: Modelado y geovisualización de variables antrópicas para el cálculo de vulnerabilidad ante riesgos de eventos extremos climáticos: plazas turísticas en Andalucía. .	97
R. Hoffrén, D. Borini, C. Iranzo, R. Serrano-Notivoli, R. Montorio, F. Pérez-Cabello: Series multitemporales armonizadas de NDVI aplicadas al análisis de la recuperación vegetal post-fuego desde una perspectiva fenológica	103
A. Salas-Peña, A. Condeço: MaaS4All: simulando la adopción de MaaS desde un enfoque basado en multi-agentes e integrado en SIG	110

L. Martín-Forero: Técnicas de modelado 3D en SIG a partir de datos abiertos para implementar en <i>City Information Modelling</i> (CIM).....	117
S. Elía-García, R. Temes-Cordovez, A. Ruiz-Varona: Los SIG aplicados a las vistas paisajísticas realizadas durante la Guerra Civil en el frente norte de Aragón	123
N. Cartes, X. Pons: Creación de imágenes sintéticas en el IRoc en imágenes Sentinel-2: estudio preliminar en cubiertas del suelo de diferentes zonas mundiales	130
J. Estrany, J. Fortesa, J. García-Comendador, A. Moragues, M. Tomàs, M. Rodríguez, B. Ramis, J. Ordinas, J. Cloquell, M. LLompart, J. Company, F. Cuello, M. Ribas, M. Ruiz: Visor RiscBal: Monitorización y Modelización en Tiempo Real para la Gestión de Riesgos Naturales en Baleares.....	136
3. PARTICIPACIÓN CIUDADANA Y COLABORACIÓN EN TIG	143
J. Vargas, P. Paneque: Dashboards geoespaciales y ciencia ciudadana. Fortalecimiento social para la transición hidrológica	144
R. Pizà: Expansión urbana y procesos de turistificación en “Son Sunyer”, Palma de Mallorca	151
R. Olivella González, G. Boix Xamaní, J. Sitjar Suñer: Los mapas web como soporte a procesos de participación y ciencia ciudadana	158
4. SECTORES DE APLICACIÓN Y USO DE LAS TIG	164
R. Talavera-García, B. Moya-Gómez, J. Gutiérrez-Puebla: Análisis de patrones de movilidad turística en Madrid mediante datos de telefonía móvil.....	165
M. Fuster-Uguet , I. Murray: En busca de nuevas fronteras de mercantilización turística. Análisis del proceso de difusión espaciotemporal de las cadenas hoteleras de las Illes Balears, 1995-2022	171
A. Moragues, M. Ruiz-Pérez, J. Estrany: Análisis geomorfométrico de las cuencas de drenaje de Menorca (Islas Baleares).....	178
L. Quetglas: Aplicación técnica del <i>Data Mining</i> en el estudio de la movilidad pendular en el entorno metropolitano de Sevilla	184
L. Pesquer, A. Batlle, N. Roperó, N. Hernández-Mora, E. Prat, A. Broekman, M.P. González, M. Ninyerola, L. De Stefano: Co-diseño de servicios climáticos mediante la integración de los modelos predictivos científicos, las geotecnologías y el conocimiento local	190
D. Salinas, D. Ansellem: Construyendo mapas geopolíticos de la energía: Un enfoque metodológico ..	197
A. Fornés-Horrach, X. Guaita-Mas: Creación de un sistema de información del planeamiento urbanístico y territorial de Mallorca	203
E. Usobiaga, A. Egusquiza, P. De Agustín, M. Benedito, A. Lopez: Empleo de diferentes tecnologías de información geoespacial para el análisis de la iluminación en entorno urbano y su impacto en la ciudadanía	209
P. Benito, A. González, J. Martínez: Estudio mediante teledetección de las variaciones fenológicas del cereal en Castilla y León y Castilla-La Mancha durante las últimas décadas	216
E. Santiago-Iglesias, G. Romanillos, W. Sun, J.D. Schmöcker, B. Moya-Gómez, J. García-Palomares: Impacto y recuperación de la vida nocturna durante la pandemia de COVID-19: Análisis comparativo entre Madrid y Kioto a través de datos de telefonía.....	223
A. Colom, M. Ruiz, J. de Bont: Exposición a Espacios Verdes y Riesgo de Sobrepeso y Obesidad infantil Antes y Durante la Pandemia	230
M. Rodrigues, J. de la Riva, D. Domingo, T. Lamelas, P. Ibarra, R. Hoffrén, A. García-Martín: Integración de parcelas de inventario y de teledetección para modelizar la recuperación post-incendio de comunidades arbóreas mediterráneas.....	236
A. Borràs: Geopolítica del ciberespacio y su cartografía. El caso de la desinformación prorrusa en el País Vasco y Cataluña	243
O. De Cos: Patrones espaciales intraurbanos más allá de la sección censal: metodología SIG para la desagregación armonizada por edificio de población vinculada en viviendas secundarias	249
M. Rodrigues, P. Gelabert, A. Jiménez, F. Catello: Predicción de incendios forestales extremos mediante el acoplamiento de modelos de ignición y éxito del ataque inicial	255

G. Orozco, M.P. Díaz: Optimización en la toma de decisiones para la implantación de centrales de energía renovable en Andalucía: Diseño y desarrollo de un prototipo de software	261
R. Ramírez-Romero, R. N. Ramos-Bernal, W. Romero-Rojas, R. Vázquez-Jiménez, A. Casarrubias-Castillo: SIG en el estudio de riesgo en áreas antropizadas: Barranca de los Coyotes (Guerrero, México)	268
J. Vargas: Uso del índice biótico del suelo para la estimación de la vulnerabilidad a desastres por efecto de aguas de escorrentías urbanas.....	274
A. Pastor: Vessants inestables a Alcoi. El cas dels polígons industrials de Santiago Payá, El Clergue i Sant Benet	280
P. Díaz-Cuevas, Belén Pérez-Pérez, G. Orozco-Frutos: Sistemas de Información Geográfica para una transición energética justa y eficiente. Resultados para el Mapa de Potencialidad de Energías Renovables en Andalucía (MAPER@I)	287
A. Nieto, J. A. Gutiérrez, J. M. Pérez: Análisis espacial de la accesibilidad en Extremadura y su relación con la despoblación.....	294
5. GESTIÓN, INFRAESTRUCTURAS Y TECNOLOGÍAS EMERGENTES EN TIG. FUTURO DE LAS TIG Y DESAFÍOS ACTUALES	300
N. Crespo-Lera, G. Vega-Gorgojo, J.M. Giménez-García, F. Bravo, I. Ruano: Integración de Parcelas del Inventario Forestal Nacional y Límites Municipales Mediante SIG y Tecnologías Semánticas.....	301
J. Bauzà: <i>Atalaïant des de l'espai</i> : divulgando la realidad geoespacial de las Islas Baleares mediante un corpus de datos satelitales publicado en la prensa regional	308
R. Pérez-Campaña, B. Moya-Gómez, S. Barrasa-García: Representaciones paisajísticas del Camino de Santiago y su clasificación mediante inteligencia artificial: nuevos horizontes en los estudios de la movilidad turística y el paisaje	314
A. Nieto, J. De la Riva, B. Zaragoza, A. Zabala, F. B. Galacho, M. Ruíz: Desarrollo de una base de metadatos para las actas de los congresos del Grupo de Tecnologías de la Información Geográfica (2000-2022): un análisis exploratorio	321

Comité organizador

Mauricio Ruiz Pérez. Profesor titular de Geografía Física, Universitat de les Illes Balears

Antoni Pons Esteva. Profesor permanente laboral de Análisis Geográfico Regional, Universitat de les Illes Balears

Alexandre Moragues Pascual. Geógrafo. Contratado predoctoral FPU. Departament de Geografia. Universitat de les Illes Balears.

ORGANIZA



Universitat
de les Illes Balears



Universitat
de les Illes Balears

Servei
de Sistemes d'Informació
Geogràfica i Teledetecció

SPONSORS



OPEN COSMOS
Oferta Open Cosmos a los asistentes al XX Congreso TIG

Comité Científico

Francisco Alonso Sarria - Universidad de Murcia

Joaquín Bosque Sendra - Universidad de Alcalá

Gemma Cárdenas Alonso – Universidad de Extremadura

David Cocero Matesanz - Universidad Nacional de Educación a Distancia

Ana Margarida Condeço-Melhorado – Universidad Complutense de Madrid

Juan de la Riba Fernández - Vocal-Vicepresidente Grupo de TIG de la AGE, Universidad de Zaragoza

Francisco Javier Escobar Martínez - Universidad de Alcalá

Severino Escolano Utrilla - Universidad de Zaragoza

Federico Benjamín Galacho Jiménez - Vocal Grupo de TIG de la AGE, Universidad de Málaga

Marta Gallardo Beltrán - Universidad Nacional de Educación a Distancia

Juan Carlos García Palomares - Universidad Complutense de Madrid

Montserrat Gómez Delgado - Universidad de Alcalá.

Javier Gutiérrez Puebla - Universidad Complutense de Madrid

María José López García - Universidad de Valencia.

Ana Nieto Masot - Presidenta del Grupo de TIG de la AGE, Universidad de Extremadura

Pilar Martín Isabel – Instituto de Economía, Geografía y Demografía -CSIC

Antonio Moreno Jiménez - Universidad Autónoma de Madrid

José Ojeda Zújar - Universidad de Sevilla.

Antoni Pons Esteva. Universitat de les Illes Balears

Xavier Pons Fernández - Universitat Autònoma de Barcelona

Maurici Ruiz Pérez - Universitat de les Illes Balears

Miguel Ángel Saz Sánchez - Universidad de Zaragoza.

Ismael Vallejo Villalta - Universidad de Sevilla

Alaitz Zabala Torres -Vocal Grupo de TIG de la AGE, Universidad Autónoma de Barcelona

Benito Zaragozaí Zaragozaí - Universitat Rovira i Virgili

1. FUNDAMENTOS Y HERRAMIENTAS EN TIG

Estructuras de teselas regulares y accesibilidad por carretera para el cálculo y geovisualización de indicadores de presión a la costa de Andalucía: población residente y viviendas

J. Ojeda Zújar, A. Prieto Campos, E. Sánchez Rodríguez

Departamento de Geografía Física y AGR, Universidad de Sevilla. C. Doña María de Padilla s/n, 41004 Sevilla.

zujar@us.es, <https://orcid.org/0000-0002-4672-064X>

pcampos@us.es, <https://orcid.org/0000-0001-6946-9622>

esanchez@us.es, <https://orcid.org/0000-0001-7446-4236>

RESUMEN: En esta comunicación se presenta la metodología utilizada para la generación de indicadores de presión sobre la costa de Andalucía con diferentes variables antrópicas (población residente y viviendas) que se basan en el uso de teselas regulares cuadradas para toda Andalucía (216.572 teselas) para la integración espacial de las variables socio-demográficas y territoriales, junto a las cuales se integra también su accesibilidad a la costa andaluza (3500 puntos distribuidos por el frente costero expuesto) con el cálculo del tiempo de acceso a la misma por carretera para velocidades medias en los días laborables. El cálculo de accesibilidad se ha realizado utilizando una red topológica compleja y los datos de velocidades empíricas proporcionados por Tom Tom Speed Profile para calcular una matriz de 758 millones de registros (los 216.572 orígenes –las teselas- por los 3500 puntos en que se ha dividido el frente expuesto de la costa de Andalucía). Con esta información se generan diferentes indicadores de estado y presión basados en la población residente o en el número de viviendas a partir de diferentes intervalos de accesibilidad (tiempo de acceso a la costa por carretera). Como ejemplo de los resultados de indicadores de estado y presión, el 37 % de la población residente en 2021 se encuentra a menos de 15 minutos de la costa, pero es que el 63 % del incremento de población residente entre las fechas 2002 y 2021 se ha producido en las teselas ubicadas a menos de 15 minutos de la costa, llegando en algunas provincias a situarse este incremento en torno al 90% (Málaga o Almería). Para la exploración interactiva y geovisualización de estos resultados y el enorme volumen de datos utilizados se han generado diferentes clientes web (geovisores y dashboards) con la plataforma CARTO.

Palabras-clave: accesibilidad, indicadores de presión antrópica, teselas regulares, Andalucía.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Estado de la cuestión y objetivos

En la actualidad existe una elevada demanda de datos multidimensionales integrados espacialmente. Tradicionalmente para la integración de dicha información se han utilizado las entidades administrativas (municipios, secciones censales, etc.) para variables socioeconómicas, o bien estructuras matriciales ráster para variables del medio físico por su carácter continuo espacialmente. En este sentido, las variables socioeconómicas, mayoritariamente discontinuas espacialmente, se publican agrupadas en entidades administrativas que no reflejan la distribución espacial real de las variables integradas, conllevando una importante inconsistencia espacial entre continente (las unidades administrativas) y contenido (las variables). Ello, unido a la heterogeneidad de tamaño de estas entidades, plantea la conocida problemática MAUP (*Modifiable Areal Unit Problem*). En este sentido, para minimizar estos problemas, durante los últimos años se ha generalizado el uso de estructuras de datos en rejillas o teselas regulares y multiescalares (cuadradas, triangulares, hexagonales, etc.) para estas variables, tanto proyectadas (Goerlich y Cantarino, 2012; Enrique et al., 2013) como sobre el elipsoide (Bondaruk et al., 2019).

Los estudios de accesibilidad, por otra parte, se han enfrentado al problema de obtener resultados con

alta resolución espacial, tanto por la no disponibilidad de datos sobre transporte y usos del suelo lo suficientemente desagregados espacialmente, como por las bajas prestaciones de las unidades de computación disponibles, ya que al incrementar tanto el número de orígenes y destinos, como la extensión y complejidad de las redes, las necesidades de computación aumentan de forma exponencial. Todo ello ha obligado, tradicionalmente, al uso de redes simplificadas espacialmente y orígenes asociados a unidades administrativas (municipios, secciones, etc.) que, aunque permiten simplificar los cálculos, conllevan problemas estrechamente relacionadas con la MAUP según la metodología y escala de desagregación utilizada (Taylor et al., 2003). Para superar esta limitación, los estudios más recientes utilizan fuentes basadas en redes exhaustivas y velocidades de circulación medidas a través de dispositivos móviles (*Google Maps*, *Tom-Tom Speed Profile*, etc.), normalmente aplicados a estudios de ámbito urbano, requiriendo capacidades de computación superiores y entrando de lleno en lo que se ha denominado “spatial big data”.

El objetivo general de este artículo es, por tanto, mostrar los primeros resultados del cálculo de indicadores de estado y de presión antrópica (incremento de población residente o número de viviendas) sobre la costa de Andalucía, generados a partir de la integración espacial de datos demográficos (2002 y 2021) y catastrales –viviendas- multitemporales (2013 y 2021) en una estructura de teselas regulares cuadradas proyectadas (ETRS89 LAEA) de 250 m. de resolución, así como la integración en las mismas del cálculo de accesibilidad por carretera desde todas las teselas con población residente de Andalucía o donde se ubiquen bienes catastrales residenciales, al frente costero andaluz. Para su geovisualización se desarrollaron un conjunto de clientes web que permiten la exploración interna e interactiva de todos los datos integrados, así como los indicadores calculados. Estos clientes web incluyen geovisores geográficos integrados con cuadros de mando (dashboards), habiendo utilizado para ello la plataforma CARTO.

2. METODOLOGÍA

1.2. Integración espacial de datos demográficos (población residente) y catastrales (viviendas)

Los datos demográficos proceden de la “Malla estadística de datos espaciales” distribuida por el IECA (Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía), que proporciona variables demográficas de hogares y personas (sexo, edad, nacionalidad, etc.) del Registro Longitudinal de Población de Andalucía (RLPA) agregadas en teselas regulares de 250 m proyectadas. Para las viviendas se han utilizado los datos procedentes de catastro (formatos ATOM Y CAT), asociando los bienes inmuebles residenciales de cada parcela a la dirección postal y edificios (viviendas totales, superficie, tipología, etc.) siguiendo un método similar al aplicado por el IECA (Enrique et al., 2020). Posteriormente, las viviendas se agregan en la estructura de teselas que utiliza la malla estadística del IECA (proyectadas en el sistema de referencia de coordenadas ETRS89 LAEA). Para este artículo se han utilizado datos demográficos publicados en la Malla estadística del IECA para los años de referencia 2002 y 2021, y para las viviendas los datos de Catastro de 2013 y 2021. Al final, las variables seleccionadas (variables de población residente o viviendas), se integran en un total de 216.572 teselas con registros poblacionales y de vivienda en alguna de las fechas consideradas para toda Andalucía.

2.2 Cálculo de accesibilidad por carretera al frente costero de Andalucía

La extensión del área de estudio ha requerido que la unidad de medida estándar de accesibilidad contemplada sea el tiempo en viaje, expresado en minutos. Para los orígenes se han utilizado los centroides de las 216.572 teselas, seleccionándose aquellas que contenían datos en cualquiera de los años utilizados: 2002, 2013 y 2021. Para los destinos, se subdividió el frente costero de Andalucía en 3500 puntos (con una equidistancia de 250 m.), asumiéndose que todos los destinos tienen el mismo nivel de atracción.

Para el cálculo del tiempo de accesibilidad (en colaboración con el grupo T-GIS de la UCM) se ha utilizado la red con topología detallada de Tom-Tom, junto con el registro histórico de las velocidades y tiempos de viaje por carreteras (*Historical Speed Profiles* de Tom-Tom -versión 2018 Q3-). Las velocidades y tiempos asignados a cada arco de la red corresponden a los valores medios de los días laborales en el período entre picos de tráfico (de 10:00 a 16:00 horas). Los datos han sido obtenidos a lo largo del período comprendido entre los dos últimos trimestres de 2016, todo el año 2017 y los dos primeros trimestres de 2018 (2 años). Como proceso final se integró, en cada una de las 216.572 teselas de origen, el tiempo de viaje (en minutos) por el camino de mínimo tiempo a cada uno de los destinos (3500 puntos del frente costero), obteniéndose una matriz de origen-destino en un fichero que alcanzó los 758 millones de registros.

2.3 Generación de base de datos espacial (PostgreSQL/PostGis) y cálculo de indicadores

2.3.1. Generación de base de datos espacial y tratamiento previo de los datos brutos

Para el almacenamiento de los datos asociados a orígenes y destinos, se utilizó la base de datos espacial (PostgreSQL/PostGis). En primer lugar, la nomenclatura de las variables en las fuentes originales fue sustituida por nombres más descriptivos. De igual modo, los registros de los *shapefiles* del IECA con valor 0, referentes a teselas donde la variable no está definida, fueron sustituidos por valores “null”, con el objetivo de no ser tenidos en cuenta en cálculos estadísticos. También fue incluido el código de la unidad administrativa en la que se inscribe cada tesela, tanto a nivel de provincia como de municipio. En este sentido, se han tenido en cuenta las diversas modificaciones administrativas (segregaciones municipales) sufridas por la región andaluza en el período de estudio. Por último, y a la vez más importante, fue el tratamiento de los registros con valor -1, asociado a celdillas que incurren en secreto estadístico para los datos poblacionales. En este caso, se le asignó un *valor estimado* para hacer coincidir los datos demográficos totales de cada variable con los datos oficiales de población de dichas variables a nivel de comunidad autónoma (condición picnofiláctica).

2.3.2. Cálculo de indicadores (población y viviendas)

Los indicadores utilizados han sido ampliamente aplicados para conocer la situación real y el comportamiento de variables a lo largo del tiempo (MAGRAMA, 2016). En este sentido, la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) define una serie de indicadores, entre ellos el ritmo de incremento poblacional, como fenómeno describable de la presión a la que se ven sometidos ciertos territorios de cara a su desarrollo sostenible (OECD, 2016). Siguiendo este criterio, el presente artículo se han calculado dos tipos de indicadores: el primero, correspondiente a la distribución de la población residente y número de viviendas para los años de estudio (indicadores de estado); y el segundo, que refleja el aumento de la presión antrópica sobre el litoral (indicadores de presión), calculando para cada variable y período (o subperíodo) temporal su variación absoluta y su porcentaje de variación. Los dos tipos de indicadores se expresan por tramos de tiempo de accesibilidad a la costa (Tabla 1).

Tabla 1. Intervalos de tiempo de accesibilidad al frente costero por carretera.

1	Menos de 5 minutos
2	Entre 5 y 15 minutos
3	Entre 15 y 30 minutos
4	Entre 30 y 60 minutos
5	Más de 60 minutos

2.4 Generación de clientes web (geovisor y dashboard) en la plataforma Cloud de CARTO

Para optimizar la geovisualización, exploración y análisis de las variables e indicadores obtenidos, se han desarrollado clientes web ligeros en un entorno *cloud* (geovisor, widgets y dashboard), que responden a una de las prioridades de la Unión Europea en materia de ciencia abierta¹ para facilitar el acceso, la explotación y la difusión de los resultados de la investigación a través de internet. Una vez integrada la base de datos de indicadores en la plataforma de CARTO, la herramienta “*Builder*”² permite numerosas posibilidades para la exploración interactiva (utilización de widgets categóricos, de histogramas, de fórmulas o de series temporales) y el análisis de los datos. Tras decidir cómo visualizar los datos (semiología), el tipo de widgets (categóricos, de histograma, etc.) a utilizar para su exploración, agrupación y filtrado, su publicación en internet a través de un cliente ligero es directa y automática, sin que se requiera el uso de código. En definitiva, se trata de clientes orientados a la exploración interna de los datos integrados espacialmente ofreciendo múltiples posibilidades para la geovisualización de los resultados a través de filtros y selecciones interactivas,

¹ European Open Science Cloud (EOSC). <https://ec.europa.eu/research/openscience/index.cfm?pg=open-science-cloud>

² CARTO Builder. <https://carto.com/builder/>

pudiendo anidarse varias de ellas (ver Ojeda et al., 2021 para datos de renta a nivel municipal o Prieto y Ojeda, 2024 para erosión costera).

2. RESULTADOS

Los resultados obtenidos se sintetizan en dos apartados: (i) la expresión gráfica de los *indicadores de estado y presión agregados a nivel autonómico y provincial*, utilizando los tramos de tiempos de accesibilidad a la costa; y (ii) la generación de *dos clientes web (geovisor y dashboard) que permiten explorar los resultados para un conjunto mayor de variables de forma interactiva y su geovisualización multiescalar*.

2.1. Indicadores de estado y presión agregados a nivel autonómico y provincial

- Población residente:** La Figura 1 permite observar los resultados del indicador de estado para el porcentaje de población total residente en el año 2021 y del indicador de presión que refleja el porcentaje de variación de la población residente para el periodo 2002-2021 por intervalos de tiempo de accesibilidad.

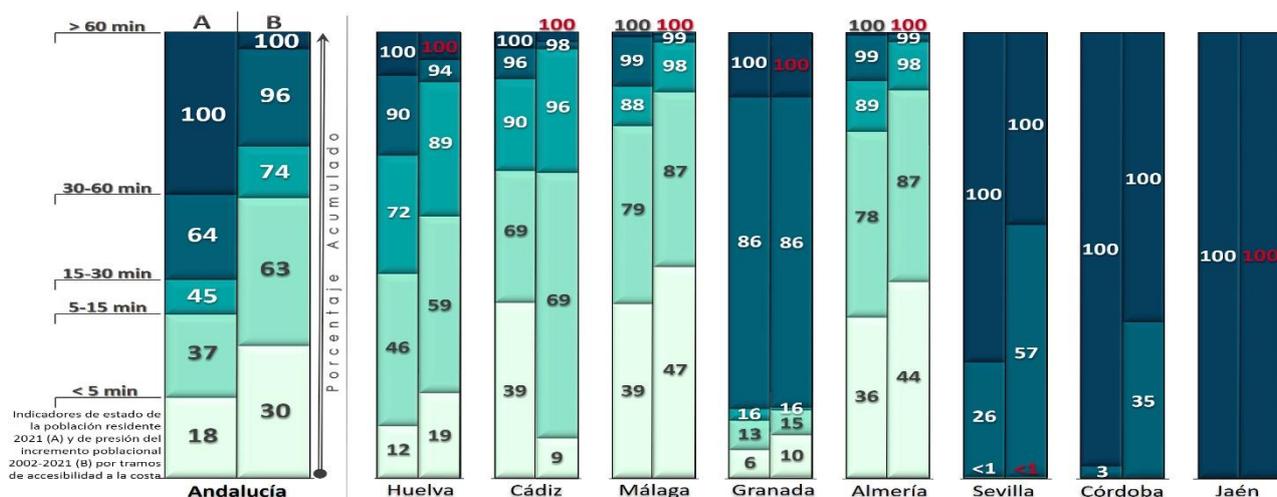


Figura 1. Indicadores de estado y presión de la población total residente por tramos de accesibilidad a la costa.

Puede observarse cómo el 37% de la población residente en 2021 de toda Andalucía se encuentra a menos de 15 minutos de la costa, pero es que el 63% del incremento de población residente entre las fechas 2002 y 2021 se ha producido en las teselas ubicadas a menos de 15 minutos de la costa, llegando en algunas provincias a situarse este incremento en torno al 90% (Málaga o Almería) e, incluso, que porcentajes entre el 44 y 47 se hayan producido en teselas a menos de 5 minutos para estas provincias.

- Número de viviendas:** La Figura 2 permite observar los resultados del indicador de estado para el número de viviendas en el año 2021 y del indicador de presión que refleja el porcentaje de variación en el número de viviendas para el periodo 2013-2021 por intervalos de tiempo de accesibilidad.

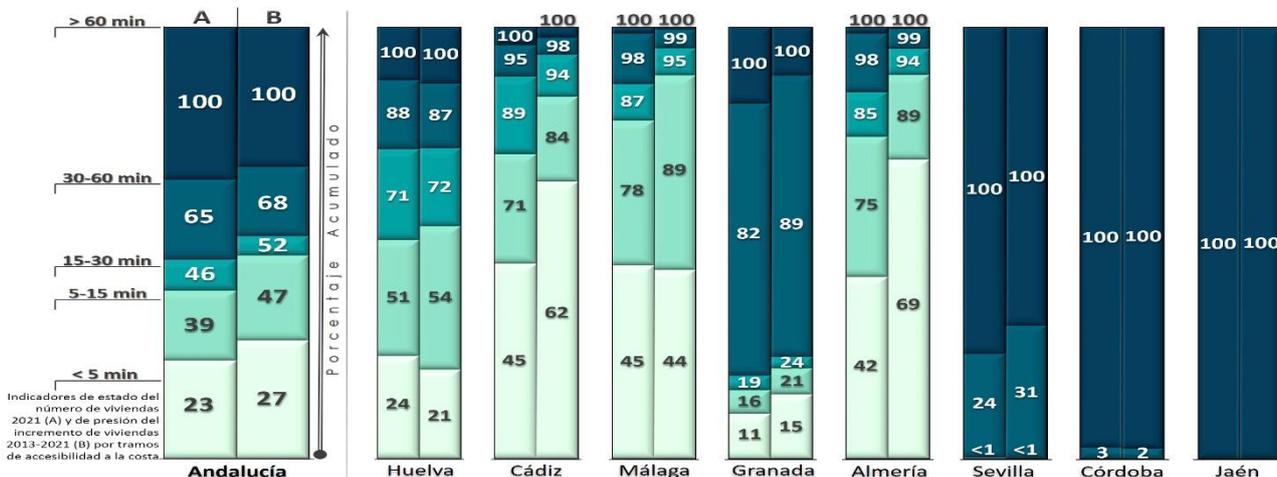


Figura 2. Indicadores de estado y presión del número de viviendas por tramos de accesibilidad a la costa.

Puede observarse cómo el 39% del número de viviendas en 2021 se encuentra a menos de 15 minutos de la costa, elevándose al 47% el incremento de las mismas entre fechas 2002 y 2021. Provincialmente, este incremento se sitúa entre el 84 y 90% en Almería, Málaga y Cádiz. Particularmente intenso es este incremento para tiempos de acceso a menos de 5 minutos en las provincias de Almería (69%) y Cádiz (62%).

3.2 Clientes web para la geovisualización y exploración interactiva de los datos

Resultados complementarios y más detallados para cualquier ámbito de Andalucía se recogen en los enlaces a los dos clientes web desarrollados (Figuras 3 y 4):

- **Población residente en Andalucía (2002-2021):** <https://universidad-sevilla.carto.com/u/univ-sevilla-admin/builder/e0d781ba-2e7a-4559-91ce-f88251ca2ad0/embed>

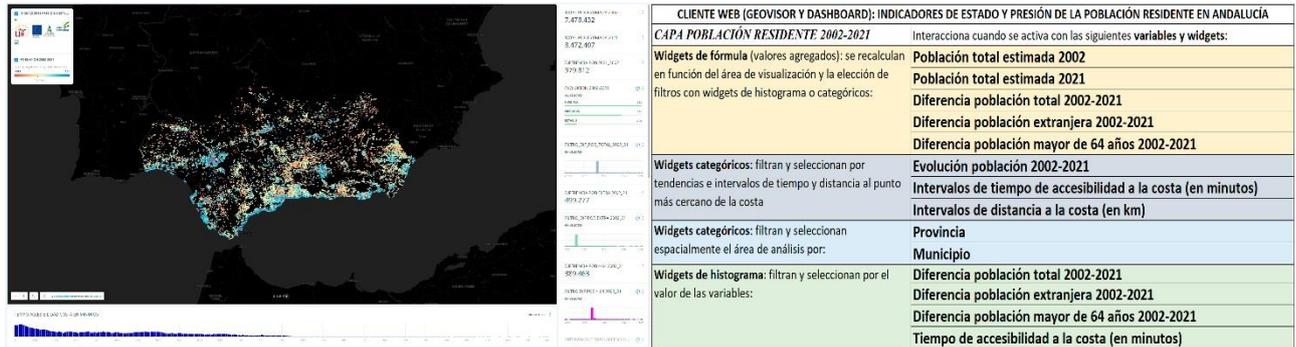


Figura 3. Interfaz y variables representadas en el cliente web para la población total residente en Andalucía.

- **Número de viviendas (2013-2021):** <https://universidad-sevilla.carto.com/u/univ-sevilla-admin/builder/7dcb99bc-de49-4148-bb6b-ac23218ce287/embed>

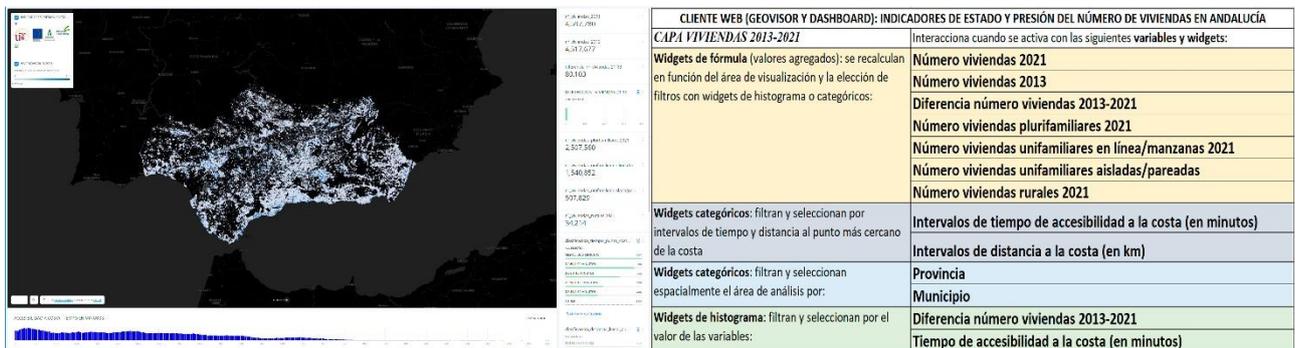


Figura 4. Interfaz y variables representadas en el cliente web para el número de viviendas en Andalucía.

En ambos casos, los clientes web (geovisor y dashboard) permiten una exploración interna de los resultados, tanto espacial como estadística, para un mayor número de variables (Figuras 3 y 4) a través diferentes tipos de widgets. Mediante los widgets de *fórmula* se recalculan en tiempo real las variables representadas para cualquier nivel de zoom y/o la selección realizada en los filtros de los widgets de *histograma* (que filtran por el valor bruto de las variables) y/o filtros *categóricos* (que filtran por tramos de tiempo accesibilidad a costa, tipo de evolución, provincias o municipios). El uso anidado de ellos permitiría a cualquier usuario externo calcular indicadores agregados similares a los presentados en el epígrafe anterior (3.1) a cualquier escala, en cualquier ámbito administrativos y/o con cualquier otro intervalo de tiempo (minutos) o distancia euclídea a la costa (km). Es por ello, que constituyen el principal resultado de este trabajo ya que convierten a estos clientes en verdaderas herramientas de trabajo para cualquier usuario externo (investigadores, técnicos o ciudadanos).

3. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos muestran el interés de los dos procesos con una mayor componente de novedad e innovación en relación al análisis espacial para el cálculo de indicadores de presión antrópica sobre el medio litoral de Andalucía: (i) la integración de datos poblacionales y vivienda en estructuras de teselas

regulares proyectadas y (ii) el análisis de accesibilidad por carretera. En el primer caso, se ofrecen los datos integrados en estructuras de teselas regulares minimizando los efectos MAUP y presentando una estructura óptima para el análisis y cálculo de indicadores posteriores al presentarse en cada tesela como un vector n-dimensional (Pérez et al., 2017). En el segundo caso, la aplicación de los análisis de accesibilidad, al operar sobre orígenes discretizados en las teselas, simplifican enormemente los procesos de cálculo a pesar de que el resultado de la matriz orígenes/destinos, en este caso, asciende a 758 millones de registros. Hubiera sido muy complejo y costoso computacionalmente abordarlo con los clásicos cálculos punto a punto. Por otra parte, el error máximo cometido en la asignación de tiempos de accesibilidad es de ± 10.5 segundos, correspondientes al tiempo en recorrer 175 metros (distancia máxima aproximada entre el centroide y cualquier esquina de la tesela) a una velocidad media de 60 km/h. Por lo tanto, se trata de un error muy bajo y, por consiguiente, asumible para los objetivos de este artículo en el que los umbrales de tiempo de los indicadores calculados se encuentran expresados en minutos. En relación a los resultados se han constatado los procesos de intensificación de la presión antrópica tanto en las variables poblacionales como en las de vivienda, expresados en nuevas entidades para su agregación (intervalos de tiempo de accesibilidad a la costa). Por último, la generación de clientes web orientados a la exploración interna de los datos brutos e indicadores suponen un avance significativo en relación a otros clientes que ofrecen la información tanto semiológica como estadística de forma más estática y menos interactiva, convirtiéndose no solo en herramientas para la difusión y geovisualización de los datos, sino en verdaderas herramientas de análisis y trabajo para los potenciales usuarios (ciudadanos, administración o científicos) que permiten testar diferentes expresiones de los indicadores de presión de forma interactiva.

AGRADECIMIENTOS

Parte de los resultados de este trabajo se realizaron en el contexto de los siguientes proyectos: “Infraestructuras científicas para la vigilancia y adaptación al cambio global en Andalucía” (INDALO_Lifewatch) y PID2019-106834RB-I00 (RiskMACLOUD) Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades; P18-FR-2574 (CLOUDRISK_A) Junta de Andalucía (Consejería de Economía y Conocimiento).

4. BIBLIOGRAFÍA

- Bondaruk, B., Roberts, S. A., Robertson, C. (2019). Discrete global grid systems: Operational capability of the current state of the art. *Spatial Knowledge and Information—Canada—Proceedings*, 7(6), 1-9.
- Enrique, I., Martínez, J. V., Torres, A. R., Casares, S. O. (2020). Identificación de las viviendas y sus características en la información del Catastro: El caso de Andalucía. *CT: Catastro*, 99, 35-58.
- Enrique, I., Ruiz, J. M., Casares, S. O., Escudero, M., Pérez, G. (2013). Distribución espacial de la población en Andalucía. Año 2013. *Cuadernos geográficos de la Universidad de Granada*, 52(2), 153-157.
- Goerlich, F. J., I. Cantarino (2012). *Una grid de densidad de población para España*. Bilbao: Fundación BBVA (Informes 2012 Economía y Sociedad).
- Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente -MAGRAMA- (2016): *Estrategia de adaptación al cambio climático de la costa española*. 120 p.
- Ojeda Zújar, J., Paneque Salgado, P., Sánchez Rodríguez, E., Pérez Alcántara, J.P. (2021). Geografía de la renta de los hogares en España a nivel municipal: nuevos datos y nuevas posibilidades de geovisualización, exploración y análisis espacial en entornos cloud. *Investigaciones Geográficas*, 76, 9-30. <https://doi.org/10.14198/INGEO.18993>
- Organization for Economic Cooperation and Development –OECD- (2016): *OECD Labour Force Statistics 2015*, OECD Publishing, París. https://doi.org/10.1787/oecd_lfs-2015-en
- Pérez-Alcántara, J. P., Ojeda-Zújar, J., Díaz-Cuevas, M. P., Álvarez-Francoso, J. I. (2017). Integración de Datos Poblacionales y Catastrales en estructura GRID: primeros resultados para el espacio residencial en el litoral andaluz. En *Actas del XXV Congreso de la Asociación de Geógrafos Españoles*. Madrid, 25-27 de octubre de 2017. (pp. 1619-1628)
- Prieto Campos, A., Ojeda Zújar, J. (2024). Methodology of data generation and calculation of erosion rates applied to littoral areas: Evolution of the Andalusian shoreline on exposed beaches during the 21st century (2001-2019). *Investigaciones Geográficas*, 81, 9-31. <https://doi.org/10.14198/INGEO.25242>

Taylor, C., Gorard, S., Fitz, J. (2003). The modifiable areal unit problem: segregation between schools and levels of analysis. *International Journal of Social Research Methodology*, 6(1), 41–60.
<https://doi.org/10.1080/13645570305053>

Generación de cartografía de cicatrices de deslizamientos de tierra mediante imágenes satelitales a través del teorema de Bayes

A. Casarrubias-Castillo¹, R.N. Ramos-Bernal^{2,3}, A. Alarcon-Paredes^{2,4}, R. Vázquez-Jiménez^{2,3}, R. Ramírez-Romero¹

¹ Maestría para la Innovación y Desarrollo Tecnológico, Universidad Autónoma de Guerrero, 39070 Chilpancingo (Guerrero, México).

² Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Guerrero, 39070 Chilpancingo (Guerrero, México).

³ Research Group on Technologies for Landscape Analysis and Diagnosis (TADAT), Department of Chemical and Environmental Technology, ESCET, Rey Juan Carlos University, 28933 Móstoles, (Madrid, Spain).

⁴ Centro de Investigación en Computación, Instituto Politécnico Nacional, 07738 Mexico City, Mexico.

11082541@uagro.mx, <https://orcid.org/0009-0008-1825-4451>

rnramos@uagro.mx, <https://orcid.org/0000-0001-6284-3263>

aalarcon@uagro.mx, <https://orcid.org/0000-0002-9785-1252>

rvazquez@uagro.mx, <https://orcid.org/0000-0003-1693-8303>

23501178@uagro.mx, <https://orcid.org/0009-0002-2443-5474>

RESUMEN: Los deslizamientos de tierra pueden ser sumamente devastadores, originados principalmente por precipitaciones extraordinarias, terremotos y actividades humanas. El estado de Guerrero en México cumple con las condiciones geográficas y físicas para que estos se presenten, lo cual ha traído como consecuencia la pérdida de vidas humanas y considerables daños materiales. Este trabajo se centra en la generación de un inventario cartográfico de deslizamientos de tierra a través de la aplicación del teorema de Bayes a valores NDVI obtenidos de una imagen Landsat 8 posterior a los hechos de septiembre de 2013 en la microcuenca “Huajapan” localizada en Guerrero, por el paso de los huracanes Ingrid y Manuel. Se evaluó la confiabilidad del mapa con una matriz de confusión y se obtuvo el índice de concordancia Kappa de 79,57, respecto a un inventario de verdad terreno con polígonos verificados. Para mejorar los resultados obtenidos se utilizó un mapa de pendientes y se definieron dos criterios: descartar como deslizamientos zonas con pendientes menores a 6° (Kappa 83,51) de acuerdo con la opinión de expertos y, aplicando el teorema de Bayes descartar zonas con pendiente inferiores a 24° (Kappa de 63,29). Originalmente, el teorema de Bayes fue utilizado para expresar la probabilidad condicional de un evento aleatorio, teniendo amplias aplicaciones, particularmente en geomática puede ser utilizado en conjunto con un mapa de pendientes para generar inventarios automáticos de deslizamientos de tierra.

Palabras-clave: Deslizamiento de tierra, teorema de Bayes, pendientes, Landsat 8, estado de Guerrero, México.

1. INTRODUCCIÓN

Los deslizamientos de tierra se presentan comúnmente en lugares con terreno accidentado con morfología montañosa y escarpada. Existe una variedad de factores que intervienen para que se origine este tipo de fenómenos tales como la precipitación intensa, actividad sísmica, tipo de suelo, pendiente del terreno, ausencia de vegetación, fallas geológicas, presencia de deslizamientos previos, entre otros (Malamud et al., 2004, Dahal et al., 2006). Algunos deslizamientos también pueden originarse a consecuencia de actividades antrópicas como construcción de carreteras, sobreexplotación de agua del subsuelo, deforestación para agricultura, crecimiento de población o actividad industrial, entre otras causas (Gorsevski et al., 2006). Características que cumple el estado de Guerrero en México, su ubicación geográfica lo hace particularmente vulnerable a la presencia de actividad sísmica pero además el situarse en la región intertropical con el océano Pacífico lo expone ante fenómenos hidrometeorológicos extraordinarios que a su vez propician fenómenos derivados, como inundaciones o deslizamientos de tierra.

Conocer la ubicación y dimensiones de los deslizamientos de tierra es crucial por varias razones. En primer lugar, proporciona a la comunidad científica una base sólida para investigar la susceptibilidad, vulnerabilidad y riesgo asociados con estos eventos. En segundo lugar, permite a la sociedad identificar las áreas con riesgo potencial, protegiendo así su seguridad, patrimonio e infraestructuras, además ofrece a las autoridades competentes la información necesaria para llevar a cabo actividades de gestión y prevención frente a estos fenómenos.

La tecnología y marcos de conocimiento actuales propios de la Geomática, como la percepción remota, permiten desarrollar estudios para evaluar estos fenómenos. La percepción remota al proporcionarnos información sobre la superficie terrestre sin tener contacto directo con ella (Chuvienco, 2010) es una herramienta eficaz para el estudio y caracterización de los deslizamientos de tierra que son superficiales y pueden ser captados en las imágenes satelitales en diferentes regiones del espectro electromagnético (Ramos-Bernal et al., 2021). Existen diferentes metodologías aplicadas en el estudio de los deslizamientos de tierra, como lo explican en sus trabajos diversos autores, desde la aplicación de métodos semiautomatizados de detección de cambios (Ramos et al., 2015), métodos de detección automática de cambios no supervisados (Karnjana et al., 2022) o la aplicación de algoritmos a través de *Machine Learning* y *Deep Learning* para generar inventarios de deslizamientos de tierra (Moosavi et al., 2014; Ramos et al., 2021).

Bajo este enfoque, el presente trabajo se plantea el objetivo de integrar inventarios de cicatrices de deslizamientos de tierra aplicando el teorema de Bayes a datos multiespectrales de una imagen satelital en combinación con un mapa de pendientes.

2. ZONA DE ESTUDIO

Se eligió zona de estudio la microcuenca “Huajapan”, ubicada en la parte central del estado de Guerrero, México. Tiene una extensión de 1.300 km², representa el 2,04 % de la superficie total del estado y abarca parte de los municipios Chilpancingo de los Bravo, Eduardo Neri, Leonardo Bravo y Tixtla de Guerrero (Figura 1). De acuerdo con los datos de población y vivienda del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), suma una población total de 59.254 (INEGI, 2020) el 1,67% de la población total. La vegetación que predomina en la zona es selva baja caducifolia (especies importantes: *Lysiloma bahamensis*, *Piscidia piscipula*, *Bursera simaruba*, *Cedrela odorata*, *Cholophora tinctoria* *Cordia dodecandra*, *Alvaradoa amorphoides*, *Lonchocarpus rugosus*, *Cordia gerascanthus*, *Gyrocarpus*, *Neomillspaughia emarginata*, *Gyrocarpus americanus* y *Caesalpinia gaumeri*, *Ehretia mexicana*, *Simarouba glauca*, *Bucida wigginsiana*, *B. macrostachya*, *Tabebuia palmeri*). También abunda bosque de pinos (*Coníferas*) y encino (*Quercus*) principalmente en el centro y sur del municipio de Leonardo Bravo y al oriente de Eduardo Neri.

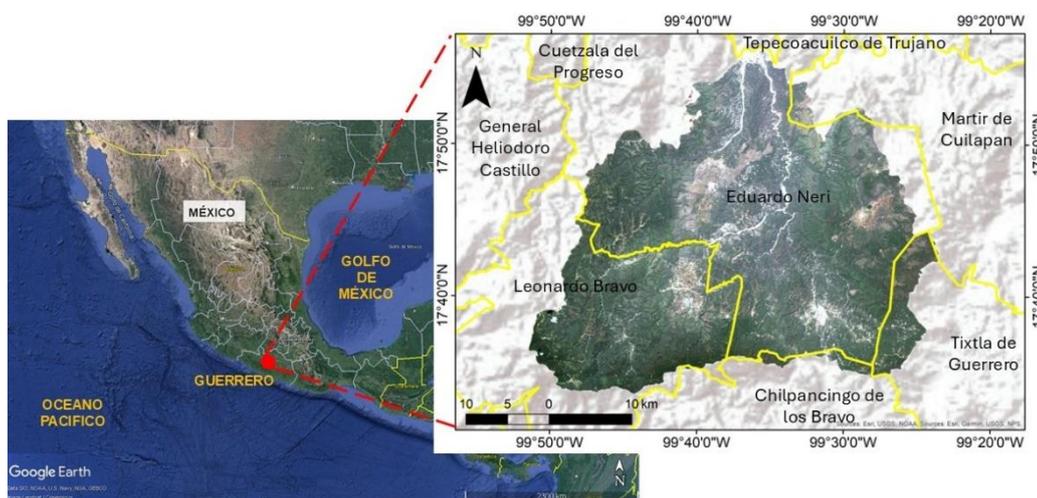


Figura 1. Microcuenca “Huajapan”. Mapa de México editado, imagen RGB Landsat 8 (elaboración propia).

La microcuenca “Huajapan” se vio afectada por numerosos deslizamientos de tierra causados por las fuertes lluvias de tres días a consecuencia de la presencia simultánea de los huracanes Ingrid y Manuel en septiembre de 2013. Su ubicación geográfica, con montañas con pendientes pronunciadas de hasta 71°, combinada con las intensas lluvias, provocaron deslizamientos de diferentes magnitudes. Estos eventos ocasionaron cuantiosos daños, especialmente en las carreteras y en el suministro de energía eléctrica debido a la caída de postes de luz.

3. METODOLOGÍA

Para cumplir el objetivo marcado, dentro de los insumos utilizados fue una imagen Landsat 8-OLI (Path-26, Row-48) de fecha 14 de diciembre de 2013, cuya resolución espacial es de 30 metros y que nos muestra las condiciones de la zona de estudio después de los eventos meteorológicos acontecidos en el mes de septiembre de ese mismo año. De esta imagen se utilizaron las bandas 4 y 5, que corresponden a las regiones del rojo e infrarrojo cercano respectivamente. Las bandas fueron corregidas. Para la corrección atmosférica se aplicó el método de sustracción de objetos oscuros (DOS-Dark Object Subtraction) el cual minimiza de manera efectiva los efectos atmosféricos (Chávez, Pat, 1988) dando como resultado una serie de imágenes similares y comparables en su respuesta espectral. Para la corrección topográfica se aplicó el modelo SCS+C (Sun Canopy Sensor + Correction) el cual tiene como objetivo caracterizar mejor la irradiancia difusa y es recomendado para las zonas de bosque montañosas, tal como la zona de estudio (Soenen et al., 2005) (Figura 2).

Fueron utilizados los datos de elevación del terreno de las cartas topográficas escala 1:50.000 cortesía del INEGI, para obtener un mapa de pendientes (Figura 2) de la zona de estudio, que representan el cambio vertical de la elevación en relación con la distancia horizontal y serán tomadas en cuenta para la construcción del inventario de deslizamientos. La zona de estudio presenta pendientes que van desde los 0° hasta los 72°.

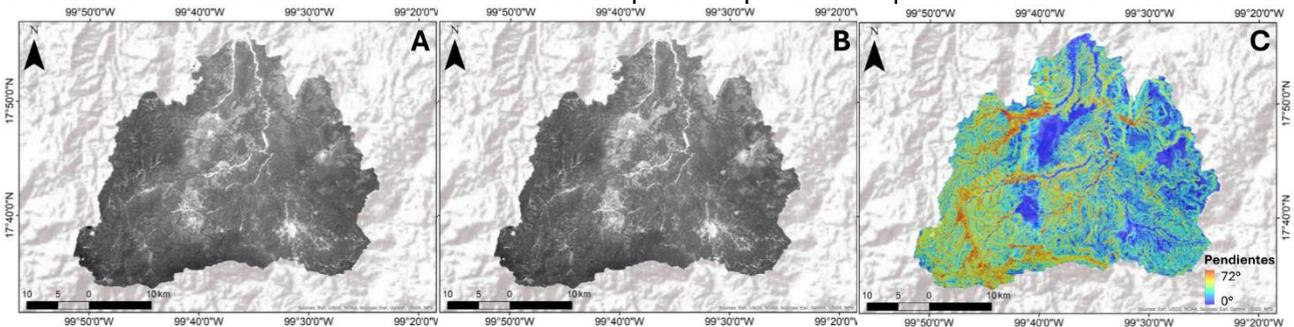


Figura 2. Insumos utilizados. A) Banda del rojo, B) Banda del infrarrojo cercano, C) Mapa de pendientes. Fuente: USGS (<https://www.usgs.gov/>), INEGI (<https://www.inegi.org.mx/>). (Elaboración propia).

El análisis también considero un inventario de verdad terreno, integrado en Google Earth que incluye zonas de deslizamiento (256 polígonos, 4.631 píxeles) y zonas de no deslizamiento (6 polígonos, 4.680 píxeles), para ser utilizado de manera aleatoria en la caracterización de cicatrices de deslizamientos (2/3 del inventario) y de validación de los resultados (1/3 del inventario) (Figura 3).

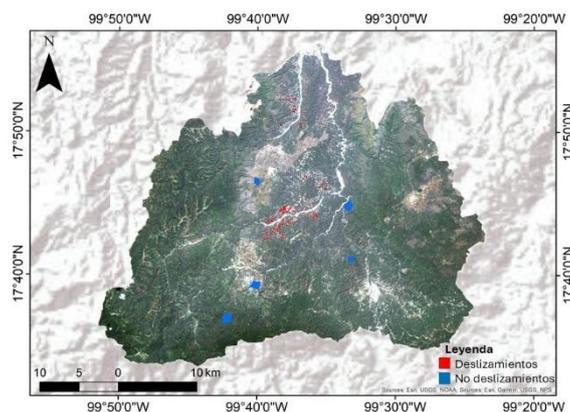


Figura 3. Digitalización de polígonos de deslizamientos en Google Earth (elaboración propia).

Se utilizaron las herramientas tecnológicas Dinámica EGO y ArcMap versión 10.7 de ArcGIS para el desarrollo de modelos y la construcción de los mapas.

3.1. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

El NDVI nos permite visualizar el estado de la vegetación. Con este índice se puede identificar fácilmente las zonas con ausencia de vegetación, como son las zonas que han sido afectadas por deslizamientos.

Para obtener el NDVI se aplicó la siguiente ecuación (Rouse et al., 1973).

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (1)$$

Donde:

NDVI es el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada,

NIR es la banda del Infrarrojo Cercano de la imagen satelital,

RED es la banda del Rojo de la imagen satelital.

3.2. Aplicación del teorema de Bayes

El modelo de probabilidad bayesiano ha sido utilizado ampliamente en estudios relacionados con deslizamientos de tierra. Do y Yin (2018) calcularon la probabilidad condicional de deslizamiento de tierra utilizando un umbral de lluvia y el modelo de probabilidad Bayesiano; Wang et al. (2020) proponen un marco probabilístico para el análisis retrospectivo de deslizamientos de tierra, considerando la incertidumbre de la superficie de deslizamiento, basándose en el teorema Bayes. Mondini et al. (2013) propusieron un método general y flexible semiautomático para detectar, mapear y clasificar los deslizamientos de tierra poco profundos inducidos por la lluvia que combina la clasificación de una imagen satelital multispectral posterior al evento con información sobre la firma morfométrica de los deslizamientos de tierra en un marco bayesiano.

En este sentido, en el presente trabajo se utilizan 2/3 del inventario de verdad terreno con las categorías 1-Deslizamiento y 2-No deslizamiento y se extraen dos conjuntos de datos. El primer conjunto contiene los valores NDVI para las categorías 1 y 2 y el segundo conjunto contiene los valores de pendientes para las categorías 1 y 2. A estos conjuntos de datos se les aplica el teorema de Bayes para calcular la probabilidad condicional de deslizamiento de tierra en la zona de estudio (Figura 4).

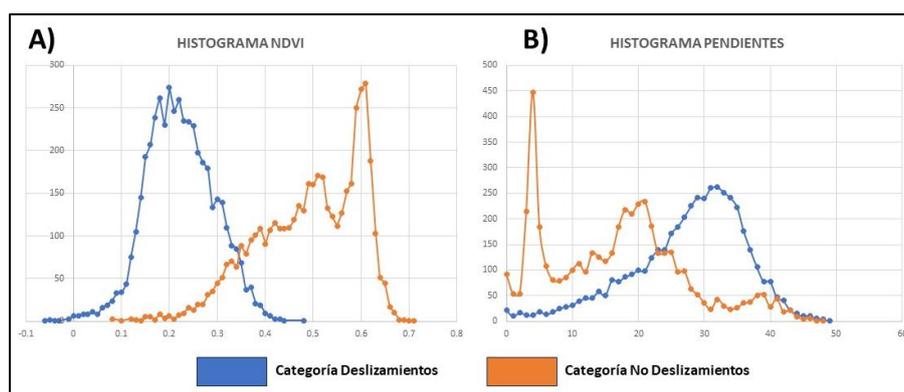


Figura 4. Gráficas de: A) Valores NDVI, B) Valores de pendiente para las muestras de verdad terreno.

En la Figura 4A se observa un punto de intersección entre los gráficos de valores NDVI para las zonas de deslizamiento y no deslizamiento, el valor corresponde a 0,35. Este dato fue utilizado para clasificar los valores NDVI de toda la zona de estudio estableciendo la condición de que aquellas zonas con valor NDVI menor o igual a 0,35 presentaban la probabilidad de ser una cicatriz de deslizamiento. Con ello se obtuvo un primer mapa de cicatrices de deslizamientos de tierra.

Respecto a la pendiente, diversos estudios confirman la hipótesis que indica que los deslizamientos ocurren con mayor frecuencia en las pendientes más inclinadas (McDermid, Franklin 1995; Park et al. 2013). Algunos trabajos sugieren que pendientes iguales o superiores a 6° favorecen la presencia de deslizamientos (Alcántara-Ayala, 2000). Por lo que en este trabajo se aplicaron dos criterios para obtener dos nuevos mapas de cicatrices de deslizamientos; el primero consiste en aplicar el teorema de Bayes a los valores de pendiente para determinar un valor mínimo para que se trate de una cicatriz de deslizamiento dando como resultado una pendiente mínima de 23° (Figura 4B), mientras que el segundo criterio considera una pendiente mínima de 6° de acuerdo con el trabajo de Alcántara-Ayala (2000).

3.3. Evaluación de la precisión de los mapas

Se evaluó la exactitud de los tres mapas de cicatrices de deslizamientos obtenidos, a través de una matriz de confusión en la que se representa la relación entre dos series de medidas que corresponden a la zona de estudio. La primera serie corresponde a 1/3 del inventario de verdad terreno de deslizamientos y no

deslizamientos, reservado para la validación de los mapas. La segunda serie corresponde a la categorización automática obtenida por la metodología seguida en este estudio.

Para cada mapa, se obtuvo el coeficiente de concordancia kappa (Cohen, 1960) para cuantificar la diferencia del acuerdo mapa-realidad observado y la diferencia que se esperaría simplemente por azar. Este coeficiente kappa permite conocer cuál de los tres mapas resultantes estadísticamente es el de mayor precisión, además permite validar la metodología presentada en este trabajo.

4. RESULTADOS

A continuación, se muestran los tres mapas de cicatrices de deslizamientos de tierra obtenidos al aplicar el teorema de Bayes y los dos criterios de pendiente mínima (Figura 5).

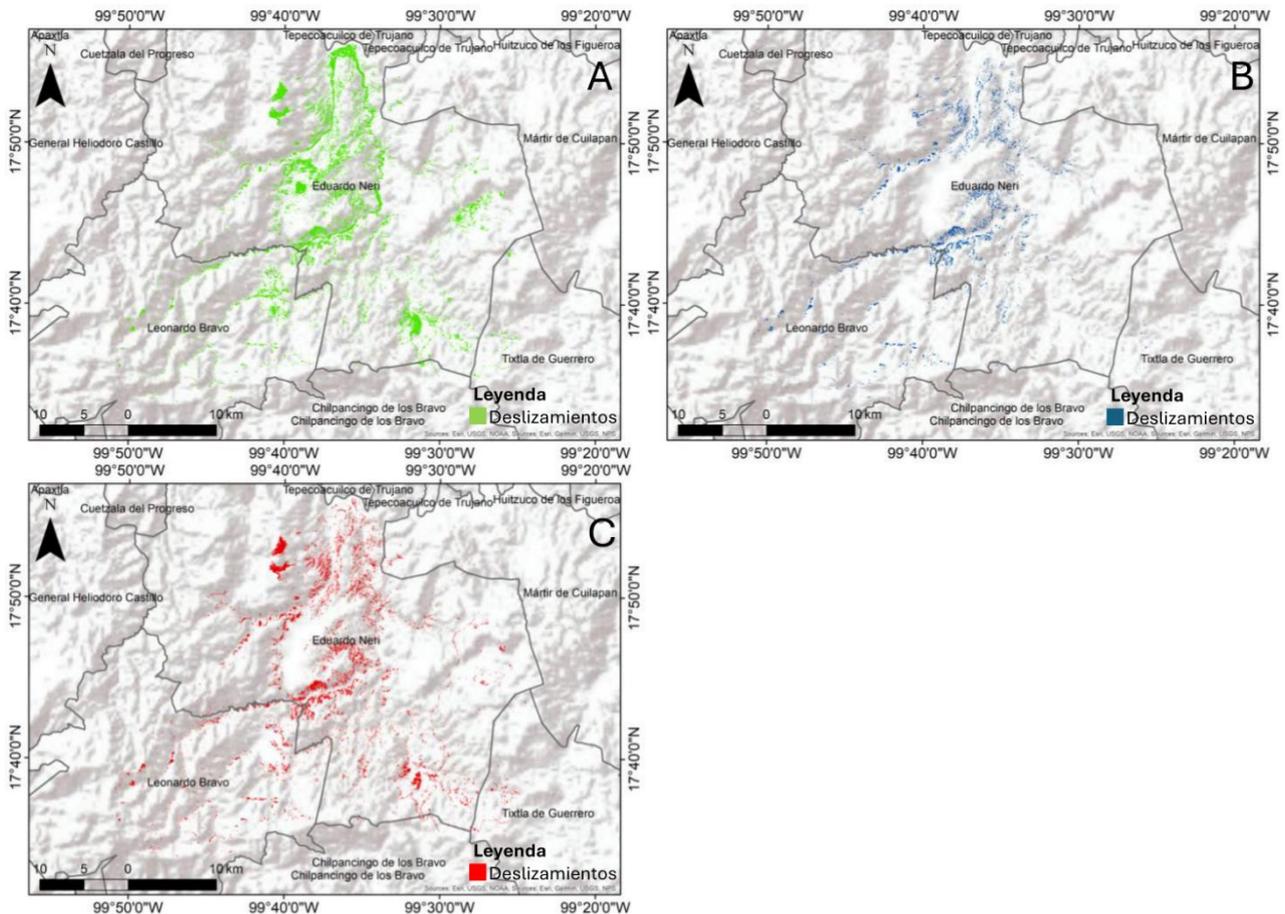


Figura 5. Inventarios cartográficos de cicatrices de deslizamientos. A) Caracterización de zonas por el teorema de Bayes a valores NDVI, B) Caracterización de zonas a valores NDVI y discriminando zonas con pendientes inferiores a 23° por el teorema de Bayes, C) Caracterización de zonas por el teorema de Bayes a valores NDVI y discriminando zonas con pendientes inferiores a 6° según el estado del arte.

En general, los tres mapas reportan cicatrices de deslizamientos que corresponden con la verdad terreno (Figura 3), así como sitios con cicatrices que no fueron inventariados. Se puede observar en la Figura 5A que solo aplicando el teorema de Bayes a los valores NDVI se incluyen zonas que corresponden a suelo desnudo, escurrimientos y barrancas, al aplicar el criterio de discriminación de pendientes inferiores de 23° se eliminan estas zonas, pero también se eliminan zonas que si corresponden a cicatrices de deslizamientos (Figura 5B). Por otro lado, el reducir el rango de pendientes mínimas a 6° visualmente parece mejorar la caracterización de cicatrices de deslizamientos, excluyendo escurrimientos y barrancas y algunas áreas de suelo desnudo (Figura 5C). Como resultado de la validación de los tres mapas el índice de concordancia Kappa reportado fue:

- Caracterización de zonas por el teorema de Bayes a valores NDVI, con un Kappa de 79,57.
- Caracterización de zonas a valores NDVI y discriminando zonas con pendientes inferiores a 23° por el teorema de Bayes, con un Kappa de 63,29.

- Caracterización de zonas por el teorema de Bayes a valores NDVI y discriminando zonas con pendientes inferiores a 6° según el estado del arte 83,51.

De acuerdo con estos resultados de validación la caracterización de zonas por el teorema de Bayes a valores NDVI y discriminando zonas con pendientes inferiores a 6° según el estado del arte (Figura 5C) es el más adecuado ya que reporta el valor más alto de Kappa y visualmente presenta más coincidencias con la verdad terreno (Figura 3).

5. CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos en los tres mapas, podemos concluir que los deslizamientos de tierra son fenómenos que se pueden caracterizar a partir de una imagen satelital de fecha a posteriori al evento desencadenante y la pendiente del terreno.

Originalmente, el teorema de Bayes fue utilizado para expresar la probabilidad condicional de un evento aleatorio, teniendo amplias aplicaciones, particularmente en geomática puede ser utilizado en conjunto con un mapa de pendientes para generar inventarios automáticos de deslizamientos de tierra.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Alcántara-Ayala, I. (2000). Índice De Susceptibilidad a Movimientos Del Terreno y Su Aplicación En Una Región Semiárida. *Revista Mexicana De Ciencias Geológicas*, vol. 17, no. 1, pp. 66-75
- Alessandro C. Mondini, Ivan Marchesini, Mauro Rossi, Kang-Tsung Chang, Guido Pasquariello, Fausto Guzzetti. (2013). Bayesian framework for mapping and classifying shallow landslides exploiting remote sensing and topographic data, *Geomorphology*, Volume 201, Pages 135-147, ISSN 0169-555X, <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.06.015>.
- Chavez, JR, Pat S., 1988. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. *Remote sensing of environment*, vol. 24, no. 3, pp. 459-479 DOI [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90019-3](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90019-3).
- Chuvieco, E. (2010). Teledetección Ambiental: La Observación De La Tierra Desde El Espacio. 1a. ed. Madrid, España: Ariel, Oct-2010 ISBN 978-84-344-3498-1.
- Cohen, J. (1960). A coefficient of agreement for nominal scales. *Educational and psychological measurement*, 20(1), 37-46.
- Couto, P. (2003). Assessing the Accuracy of Spatial Simulation Models. *Ecological Modelling*, 9/1, vol. 167, no. 1-2, pp. 181-198. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304380003001765>. ISSN 0304-3800. DOI [http://dx.doi.org/10.1016/S0304-3800\(03\)00176-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0304-3800(03)00176-5).
- Dahal, R.K., Hasegawa, S., Masuda, T. and Yamanaka, M. (2006). Roadside Slope Failures in Nepal during Torrential Rainfall and their Mitigation. *Disaster Mitigation of Debris Flow, Slope Failures and Landslides*, (Interpraevent 2007), Universal Academy Press, Tokyo, vol. 2, pp. 503-514.
- Do, H. and Yin, K. (2018). Rainfall Threshold Analysis and Bayesian Probability Method for Landslide Initiation Based on Landslides and Rainfall Events in the Past. *Open Journal of Geology*, 8, 674-696. doi: 10.4236/ojg.2018.87040.
- Gorsevski, P. V., Jankowski, P., & Gessler, P. E. (2006). An heuristic approach for mapping landslide hazard by integrating fuzzy logic with analytic hierarchy process. *Control and Cybernetics*, 35(1), 121-146.
- INEGI (2020). *Censo de población y Vivienda*. <https://www.inegi.org.mx/temas/>
- Karnjana, J., Keerativittayanun, S., Sangrit, K., Dillon, P., Tanatipuknon, A., Aimmanee, P., & Murata, K. T. (2022). Real-time monitoring system based on wireless sensor networks and remote sensing techniques for landslide-prone areas in the northern region of Thailand. *Civil Engineering for Disaster Risk Reduction*, 169-180.
- Malamud, B. D., Turcotte, D. L., Guzzetti, F., & Reichenbach, P. (2004). Landslide inventories and their statistical properties. *Earth Surface Processes and Landforms*, 29(6), 687-711.
- McDermid, G. and Franklin, S. (1995). Remote Sensing and Geomorphometric Discrimination of Slope Processes. *Zeitschrift Für Geomorphologie*, pp. 165-185.

- Moosavi, V., Talebi, A., & Shirmohammadi, B. (2014). Producing a landslide inventory map using pixel-based and object-oriented approaches optimized by Taguchi method. *Geomorphology*, 204, 646-656.
- Park, S., Choi, C., KIM, B. and Kim, J. (2013). Landslide Susceptibility Mapping using Frequency Ratio, Analytic Hierarchy Process, Logistic Regression, and Artificial Neural Network Methods at the Inje Area, Korea. *Environmental Earth Sciences*, vol. 68, no. 5, pp. 1443-1464 DOI 10.1007/s12665-012-1842-5.
- Ramos-Bernal, R.N., et al. (2015). Identificación De Deslizamientos De Laderas Aplicando Técnicas De Detección De Cambios a Imágenes Landsat En La Zona Costera Del Estado De Guerrero, México. J. DE LA RIVA, P. IBARRA, R. MONTORIO and M. RODRIGUES eds., ISBN 978-84-92522-95-8.
- Ramos-Bernal, R. N., Vázquez-Jiménez, R., Cantú-Ramírez, C. A., Alarcón-Paredes, A., Alonso-Silverio, G. A., G. Bruzón, A., ... & Arrogante-Funes, P. (2021). Evaluation of conditioning factors of slope instability and continuous change maps in the generation of landslide inventory maps using machine learning (ML) algorithms. *Remote Sensing*, 13(22), 4515.
- Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *NASA Spec. Publ*, 351(1), 309.
- Soenen, S.A., Peddle, D.R. and Coburn, C.A. (2005). A Modified SunCanopy-Sensor Topographic Correction in Forested Terrain. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 43, no. 9, pp. 2148-2159. Available from: http://bgs.ucalgary.ca/files/bgs/soenen_peddle_2005.pdf. DOI 10.1109/TGRS.2005.852480.
- Suárez Díaz, J. (1998). *Deslizamientos y Estabilidad De Taludes En Zonas Tropicales*. Universidad Industrial de Santander ed., Bucaramanga: ISBN 958-33-0800-5.
- Wang, Y., Huang, J., Tang, H. et al. (2020). Bayesian back analysis of landslides considering slip surface uncertainty. *Landslides* 17, 2125–2136. <https://doi.org/10.1007/s10346-020-01432-4>

Implementación de una Suite para la Publicación de Aplicaciones webmapping mediante Tecnologías Open Source para la Gestión y Análisis de los Datos Geo-Relacionales Reunidos en el Proyecto para la Recuperación del Mar Menor

G. Molina-Pérez¹, F Alonso-Sarría¹, FJ. Gomariz-Castillo¹, MC, Valdivieso-Ros^{1,2}

¹ Instituto Universitario del Agua y del Medio Ambiente, Universidad de Murcia. Edificio D Campus de Espinardo, 30100 (Murcia).

² Universidad Miguel Hernández de Elche.

gabriel.molina@um.es, <https://orcid.org/0009-0000-6064-2054>

alonsarp@um.es, <https://orcid.org/0000-0003-0466-5184>

fjgomariz@um.es, <https://orcid.org/0000-0003-4306-6643>

mcarmen.valdivieso@um.es, <https://orcid.org/0000-0002-4658-4633>

RESUMEN: En el marco de un proyecto para la recuperación del Mar Menor se ha reunido una gran cantidad de datos geo-espaciales, que incluyen información de diversas temáticas: climática, hidrológica, hidrogeológica, usos del suelo, etc. Tanto de fuentes propias, como procedentes de administraciones o entidades públicas estatales. En este trabajo, proponemos una solución GIS integral para la gestión, análisis y publicación de estos datos espaciales mediante la implementación de una suite versátil basada en el proyecto MapStore como *framework* para la creación de aplicaciones *webmapping*. Gracias a la excelente integración con otras tecnologías como PostgreSQL/PostGIS y GeoServer, esta suite facilitará la creación de aplicaciones web de mapas con capacidades analíticas vinculadas a los datos espaciales, *dashboards* para el control específico de eventos y/o investigaciones, e *geoStories* para la presentación de resultados. Además, ofrecerá un acceso a los servicios estándares de la "Open Geospatial Consortium" (OGC), de forma sencilla mediante el uso del "Catalog Services for the Web" (CSW) que ofrece Geoserver como extensión. Una característica destacada es la gestión de usuarios integrada entre MapStore y GeoServer, permitiendo un control de acceso a las aplicaciones mediante registros y otros filtros más específicos para los datos que lo requieran mediante roles y grupos. Los administradores de la suite podrán diseñar los contextos como plantillas de aplicaciones para que los usuarios registrados puedan configurarlas conforme a diversas temáticas e investigaciones, que además podrán compartir con otros usuarios, asignando permisos de visualización, descarga y/o edición o con el público en abierto si se precisa mediante enlaces permanentes o embebido en otras web y redes sociales. En este trabajo, proponemos, también, el diseño de un contexto de GisWeb para proporcionar principalmente acceso de visualización y análisis de la información del proyecto para la recuperación del Mar Menor. Las conclusiones de este trabajo son que esta solución GIS no solo proporcionará una plataforma robusta y flexible para la gestión eficiente de los datos espaciales recopilados en el proyecto para la recuperación del Mar Menor, sino que, además, facilitará la explotación, actualización, análisis, la difusión de los resultados o el control de eventos específicos entre otras posibilidades y podrá ser reutilizada para futuros proyectos.

Palabras-clave: Webmapping, MapStore, GisWeb, Widgets.

1. INTRODUCCIÓN

El uso de WebGIS se ha expandido a multitud de disciplinas (Randazzo et al. (2021). Entre las temáticas citadas incluyen, por ejemplo, el tratamiento de aguas residuales (Seng, et al., 2019), un sistema de monitoreo y gestión del medio ambiente acuático (Lou, et al., 2019), fases de planificación y emergencia en caso de inundaciones (Villani, et al., 2019), o un sistema de alerta temprana de deslizamientos de tierra (Ahmed, et al., 2018), entre otros.

En cuanto a las arquitecturas de softwares disponibles para la implementación de visores geográficos

podríamos hablar de las arquitecturas cliente-servidor y las orientadas a servicios descritas en Agrawal y Gupta (2017). La arquitectura cliente-servidor, en sus dos variantes: cliente ligero y cliente pesado, facilita el acceso rápido y eficiente a los datos desde cualquier lugar. La arquitectura de cliente ligero minimiza los requisitos de recursos en el cliente, trasladando la mayoría del procesamiento al servidor, mientras que la arquitectura de cliente pesado distribuye el procesamiento entre el cliente y el servidor, aprovechando las capacidades de ambos. Por otro lado, la arquitectura orientada a servicios asegura que los diferentes componentes del sistema puedan comunicarse y trabajar juntos sin problemas, gracias a la implementación de servicios estándar del *Open Geospatial Consortium* (OGC), como el *Catalog Services Web* (CSW), los *Web Map Services* (WMS), el *Web Processing Services* (WPS) o el *Web Features Services* (WFS), por citar algunos de los más conocidos.

La recuperación del Mar Menor es un desafío multidisciplinar que requiere la integración y análisis de datos procedentes de diversas fuentes y disciplinas, tales como la Climatología, Hidrología, Hidrogeología, entre otras. En este trabajo se busca proporcionar una solución integral para la gestión de estos datos mediante el uso de tecnologías WebGIS avanzadas y de código abierto. Disponemos de múltiples opciones para componer una infraestructura de software, cuya idoneidad dependerá en gran medida de los fines específicos de cada trabajo. Para este proyecto, hemos elegido el proyecto de código abierto MapStore2, desarrollado por GeoSolutions. MapStore2 no es un WebGIS en el sentido tradicional, sino una aplicación web para crear, administrar y publicar aplicaciones web de mapas, incluyendo geovisores, cuadros de mando y geohistorias, de manera simple y rápida. MapStore2, es compatible con servicios de mapas como Google Maps, OpenStreetMap, Bing y cualquier otro que utilice estándares OGC, permitiendo la visualización y consultar datos geoespaciales de múltiples fuentes.

Existen múltiples organizaciones y entidades que utilizan MapStore2 como, por ejemplo, la Ciudad de Génova (Italia), Halliburton (Reino Unido), Austrocontrol (Austria), la Ciudad de Bolzano (Italia), la Región de Toscana (Italia), la Autoridad de Cuenca del Río Arno (Italia), TIERRA-i (Reino Unido), Bruselas Urbana – BruGIS (Bélgica), Métropole de Rennes (Francia), CRAIG (Francia) y Cleveland Metroparks (Estados Unidos). Algunos de estos sitios web se encuentran publicados en abierto y pueden encontrar los enlaces en la página de presentación del proyecto (GeoSolutions SRL, 2024).

Las ventajas de usar MapStore2 para el desarrollo de aplicaciones WebGIS radican en su integración con las principales librerías de JavaScript para mapeo web como OpenLayers, LeafletJS y Cesium. La posibilidad de utilizar algunos de los sistemas de gestión de bases de datos de uso más extendido como son PostgreSQL y Oracle y ofrece integración con GeoServer, uno de los servidores de mapas más usado en la actualidad, a nivel de seguridad y autenticación. Además, la arquitectura híbrida cliente-servidor de MapStore2 permite que algunas tareas de procesamiento se realicen en el cliente y otras en el servidor, optimizando así la eficiencia y el uso de recursos. Combinada con la arquitectura orientada a servicios, asegura la comunicación y la interoperabilidad de todos los componentes.

1.1. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es implementar una solución GIS integral para la gestión, análisis y publicación de los datos reunidos y producidos en el proyecto para la recuperación del Mar Menor. Para la consecución de objetivo, definimos los siguientes subobjetivos:

- Recopilar, almacenar y organizar los datos disponibles mediante un sistema de gestión de base de datos PostgreSQL/PostGIS y publicar los datos utilizando servicios estándar de la OGC, implementando un servidor de datos geográficos, GeoServer.
- Desplegar una aplicación MapStore2 de desarrollo, identificar las herramientas disponibles que puedan cubrir las capacidades requeridas e identificar las funcionalidades a desarrollar.

2. METODOLOGÍA

El almacenamiento de los datos se lleva a cabo en un sistema de gestión de base de datos PostgreSQL que, gracias a su extensión PostGIS admite, también datos geográficos georreferenciados. Además, aprovechamos la característica de los esquemas para organizar la información por disciplinas y/o por escalas de trabajo.

Para la publicación de los datos geográficos en la red, implementamos un servidor GeoServer, que nos permitirá la utilización de los estándares OGC, como los WMS para la visualización, los WFS para el acceso a los datos y los WPS para el procesamiento de los datos, entre otros. Asimismo, para simplificar el uso de estos servicios en la aplicación añadimos la extensión *Catalog services for the web*, que proporciona una

forma eficaz para localizar los servicios web, mencionados anteriormente, y a los metadatos, facilitando el trabajo con mapas web. De igual modo, agregamos la extensión Authkey que posibilita la unificación de la gestión de usuarios entre la aplicación web de mapas y GeoServer. Por último, para organizar los servicios usamos los espacios de trabajo de GeoServer denominando uno por cada esquema de la base de datos.

Implementamos un entorno de desarrollo siguiendo las indicaciones de la guía para desarrolladores de MapStore2, (GeoSolutions). Instalamos las dependencias desarrollo: NodeJS, NPM para el frontend, Maven y Python3 para el backend. tanto las dependencias como las versiones requeridas se detallan en la mencionada guía. Una vez instaladas las dependencias de desarrollo procedemos a crear un proyecto de MapStore2 (GeoSolutions.GitHub), mediante la tecnología *git* desde su repositorio en GitHub con lo que obtendremos una aplicación lista para realizar los cambios necesarios, para ver los pasos este proceso se remite al lector al README del repositorio.

A continuación, se acometen una serie de modificaciones para construir una aplicación personalizada. Primero modificamos el script de construcción para incluir el módulo de impresión. Segundo, realizamos la configuración de nuestra base de datos para configuraciones de la aplicación. Tercero, externalizamos los archivos de configuración, llegados a este punto podemos personalizar la apariencia de la interfaz y los plugins disponibles. En cuarto lugar, realizamos la integración MapStore2-GeoServer para unificar la gestión de usuarios y roles de ambas aplicaciones. En quinto y último lugar ejecutamos el archivo de construcción que nos devolverá un archivo .war para desplegarlo en nuestro servidor de producción.

En la suite, un contexto es una especie de plantilla para generar aplicaciones de mapas, creada por el administrador, para que los usuarios puedan realizar y publicar diferentes aplicaciones de mapas. En este se definen las herramientas, el conjunto de capas disponible al inicio y algunas personalizaciones tanto de las aplicaciones resultantes, como de las herramientas que se habiliten. Por lo tanto, usando la interfaz de generador de contexto creamos una aplicación con las herramientas disponibles para dotar el WebGIS de las siguientes funcionalidades: acceso a la información disponible para visualizar, analizar y descargar; análisis espacio-temporal y geoprocésamiento de la información; cargar información externa; agregar información externa tanto de archivo locales como de otros servicios públicos. Una vez realizado se determinarán las funcionalidades no disponibles a desarrollar.

3. RESULTADOS

Al acceder al WebGIS, el público dispondrá de una interfaz sencilla e intuitiva que ofrecerá la posibilidad de visualizar, analizar y descargar la información generada en el proyecto, haciendo sus propias composiciones y con la posibilidad de imprimirlo.



Figura 1 Interfaz WebGIS público.

A groso modo, el WebGIS (Figura 1) dispone de herramientas básicas como el selector de mapas base, información sobre el sistema de referencia, escala y coordenadas del cursor y las herramientas de control para zoom, visualización 3D y la identificación de atributos de por localización. Además, dispone de los controles típicos del ratón desplazamiento del mapa manteniendo clic izquierdo y zoom mediante el scroll y la

capacidad de buscar localizaciones por nombres mediante la herramienta de búsqueda. Esta última puede configurarse para utilizar los atributos de los servicios cargados.

3.1 Catálogo

La herramienta Catálogo (Figura 2) ofrece la posibilidad de acceder a los servicios WMS, WFS, CSW, WMTS y TMS proporcionados por el proyecto, agregar las capas al mapa y visualizar los metadatos gracias al servicio CSW y a la extensión de GeoServer, *Catalog services for the web*. Además de acceder a los servicios del proyecto por defecto, también, pueden definirse servicios externos.

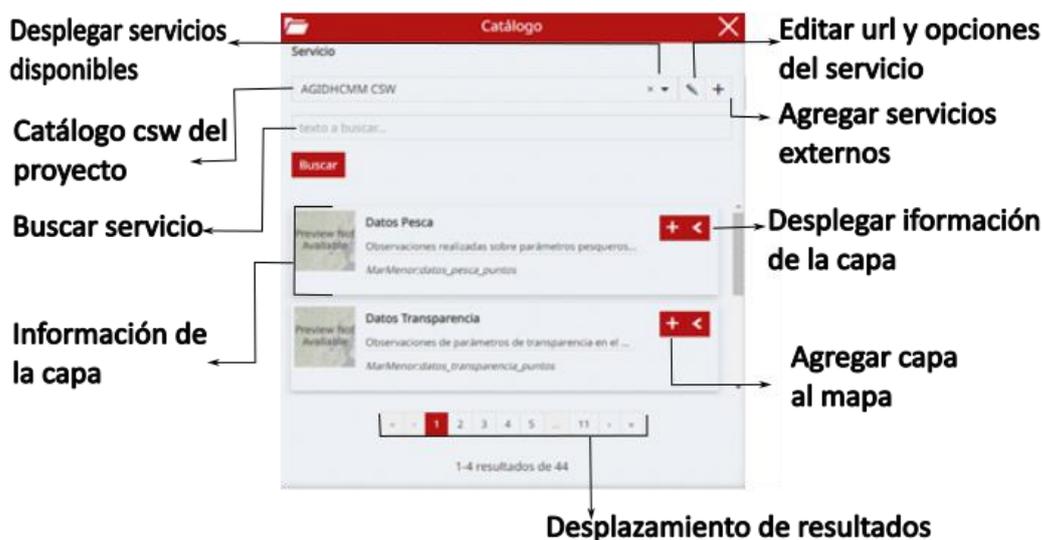


Figura 2. Herramienta catálogo

Para navegar entre la información disponible podemos buscar a través de palabras clave relacionadas, desde la barra de búsqueda o bien ir desplazando las páginas disponibles, desde el selector de la parte inferior del panel de catálogo.

3.2 Gestor de capas

El gestor de capas (Figura 3) dispone de las funciones básica para controlar la visualización, la transparencia, desplegar la leyenda y ordenar las mismas. Pero, también contiene herramientas específicas que se muestran al seleccionar cualquiera de ellas.

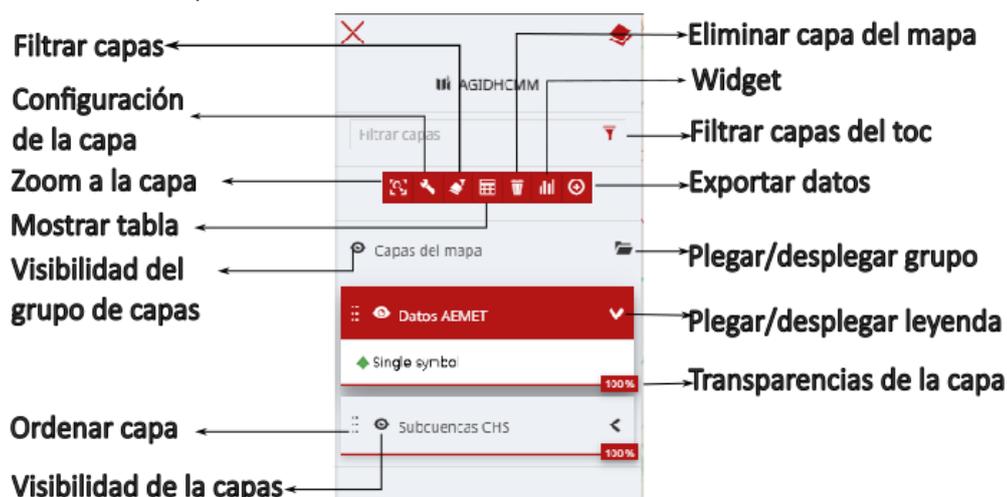


Figura 3 Gestor de capas.

Entre sus funcionalidades dispone de filtros por atributos de la capa, por región de interés o bien de relación topológica mediante una capa objetivo, abrir la tabla de atributos, eliminar la capa o exportar la capa a diversos formatos.

Posibilita múltiples configuraciones de la capa:

- Generales: título, grupo y descripción;
- Visualización: formatos, tamaño de tesela, opacidad y visibilidad por escala o resolución;
- Campos: alias y tipo de dato;
- Estilo: editar, seleccionar estilos disponibles o crear nuevos estilos;
- Información de la capa: controla la apariencia con la que se muestra la información al usar la herramienta identificar.

3.3 Widgets

El WebGIS permite incorporar al mapa diferentes tipos de widget para resumir y analizar la información disponible tales como gráficos, tablas, textos y contadores. Todos ellos pueden conectarse al mapa, de manera que al desplazarlo la información del widget se actualizan con la información contenida en la vista. Los widgets preconfigurados se almacenan en la barra de widget (Figura 1) o por el contrario el usuario puede configurarlos conforme a sus intereses.

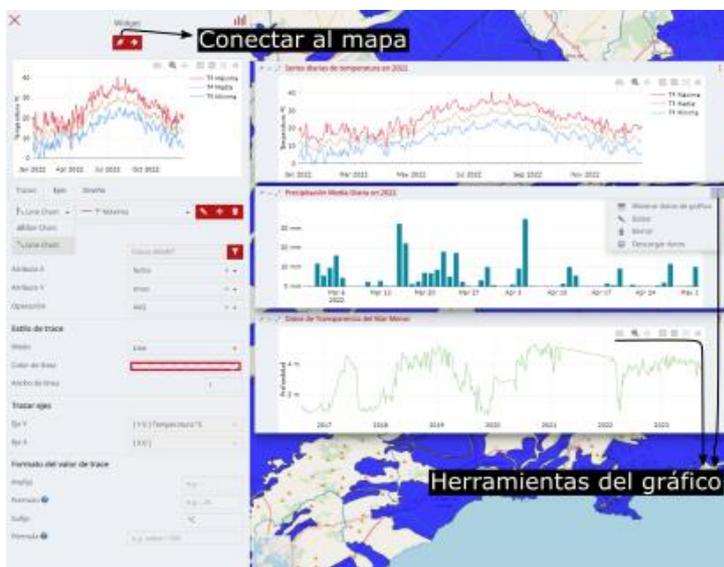


Figura 4 Widget

Para este trabajo nos interesan los widgets de gráficos para representar series temporales (Figura 4) los gráficos generados son interactivos con lo cual podemos manejar el zoom sobre las regiones del gráfico que más nos interesen, desplazarlo, exportar imágenes o consultar y descargar los datos que componen el gráfico.

3.4 Impresión

Desde la herramienta impresión podemos imprimir el mapa visualizado en diferentes escalas, resoluciones y formatos de papel (A2, A3, A4) e incluir título, descripción y la leyenda del mapa. Dispone de una plantilla en formato yaml para la configuración de la apariencia del mapa resultante por lo que es completamente configurable.

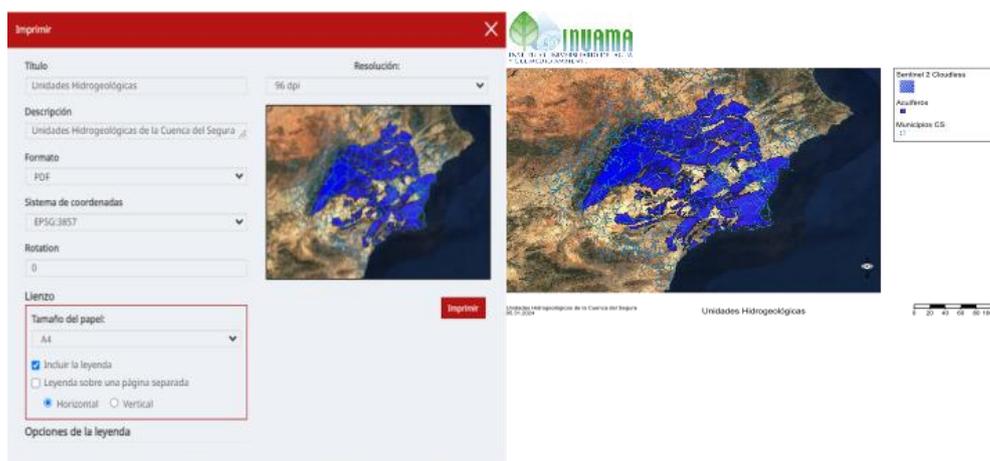


Figura 5 Impresión de mapas

4. CONCLUSIONES

La implementación de esta solución GIS integral no solo proporciona una plataforma robusta y flexible para la gestión de datos espaciales en el proyecto, sino que también facilita su explotación, actualización, análisis y difusión. La suite desarrollada podrá ser reutilizada en futuros proyectos para generar otras aplicaciones WebGIS, demostrando su valor y versatilidad en la gestión de información geoespacial.

El WebGIS diseñado desde la suite implementada proporciona una interfaz sencilla e intuitiva, que permite a los usuarios visualizar, analizar y descargar la información generada en el proyecto, facilitando la creación de composiciones personalizadas y su impresión.

Dispone de acceso a los principales servicios estándar de la OGC, mediante la herramienta catálogo que permite agregar capas al mapa y visualizar metadatos lo que mejora la accesibilidad y la gestión de la información.

El gestor de capas ofrece funciones avanzadas para el control de la visualización, la transparencia, y el orden de capas. También incluye herramientas para el filtrado por atributos regiones de interés y relaciones topológicas, lo que mejora significativamente la capacidad de análisis.

Los widgets preconfigurados y personalizables permiten resumir y analizar información de manera dinámica, actualizándose automáticamente con los cambios en la vista del mapa.

La impresión de mapas es configurable en diferentes escalas, resoluciones y formatos, incluyendo títulos, descripciones y leyenda, lo que facilita la documentación y presentación de resultados.

La combinación de las arquitecturas de software, Cliente-servidor y orientada a servicios, permite gestionar y analizar una gran cantidad de datos geo-relacionales de manera eficiente, además, de asegurar la interoperabilidad de los servicios web.

AGRADECIMIENTOS

Proyecto: TED2021-131131B-I00 financiado por MICIU/AEI/ 10.13039/501100011033 y por la Unión Europea NextGenerationEU/PRTR.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Agrawal, S. a. (11 de 2017). Web GIS and its architecture: a review. *Arabian Journal of Geosciences*, 10(23). doi:10.1007/s12517-017-3296-2
- Ahmed, B., Rahman, M., Islam, R., Sammonds, P., Zhou, C., Uddin, K., & Al-Hussaini, T. (2018). Developing a Dynamic Web-GIS Based Landslide Early Warning System for the Chittagong Metropolitan Area, Bangladesh. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 485.
- GeoSolutions. (s.f.). *MapStore2*. Recuperado el 16 de 05 de 2024, de Developer Guide: <https://docs.mapstore.geosolutionsgroup.com/en/latest/developer-guide/printing-module/>

GeoSolutions SRL. (23 de 05 de 2024). *GeoSolutionsGroup*. Obtenido de MapStore : <https://www.geosolutionsgroup.com/technologies/mapstore/>

GeoSolutions.GitHub. (s.f.). *GitHub*. Recuperado el 16 de 05 de 2024, de MapStore2: <https://github.com/geosolutions-it/MapStore2/#start-developing-your-custom-app>

Lou, K., Zhang, T., & Lui, Y. (2019). Design and Implementation of the Water Environment Monitoring and Management System Based on WebGIS for the Four-Lake Basin of Hubei Province. *E3S Web of Conferences*.

Randazzo, G., Italiano, F., Micallef, A., Tomasell, A., Cassetti, F. P., Cavalloro, F., . . . Muzirafuti, A. (2021). WebGIS Implementation for Dynamic Mapping and Visualization of Coastal Geospatial Data: A Case Study of BESS Project. *Applied Sciences*.

Seng, B., Liang, H., Zhao, Y., & Tang, Y. (2019). Design and Implementation of Visualization System for Wastewater Treatment in Dianchi Lake Based on WebGIS. *E3S Web of Conferences*.

Villani, G., Nanni, S., Tomei, F., Pasetti, S., Mangiaracina, R., Agnetti, A., . . . Castellari, S. (2019). The RainBO Platform for Enhancing Urban Resilience to Floods: An Efficient Tool for Planning and Emergency Phases. *Climate*, 145.

Mapa de las Áreas de Salud y Zonas Básicas de Salud de España

Carmen Bentué Martínez¹, Severino Escolano Utrilla¹, Nacho Quílez Aznar¹, José Antonio Salvador Oliván²,
María Zúñiga Antón¹

¹ Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio, Universidad de Zaragoza. C. Pedro Cerbuna 12, 50009 Zaragoza (Aragón).

² Departamento de Ciencias de la Documentación e Historia de la Ciencia, Universidad de Zaragoza. C. Pedro Cerbuna 12, 50009 Zaragoza (Aragón).

cbentue@unizar.es, <https://orcid.org/0000-0002-7213-1718>

severino@unizar.es, <https://orcid.org/0000-0002-3489-0692>

nachoquilez@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4035-9996>

jaso@unizar.es, <https://orcid.org/0000-0001-8568-3098>

mz@unizar.es, <https://orcid.org/0000-0002-9541-5609>

RESUMEN: La investigación de las distribuciones espaciotemporales de los eventos de la salud humana es fundamental para la investigación de la epidemiología de enfermedades, así como para la planificación y administración de recursos de salud y para evaluar la eficacia y la equidad de los servicios sanitarios públicos. Los mapas sanitarios representan las delimitaciones territoriales en las que se registran los eventos agregados de la salud humana, las características de las poblaciones y del territorio y los recursos sanitarios y son, por tanto, instrumentos esenciales para estas finalidades. Las unidades administrativas de organización y asignación de recursos y servicios sanitarios en España son las Áreas de Salud y las Zonas Básicas de Salud, y su delimitación depende de las Comunidades Autónomas. Esta descentralización ha dificultado la elaboración de un mapa sanitario oficial y unificado de todo el territorio nacional y ha supuesto importantes limitaciones a la hora de homogeneizar la información sanitaria. Este trabajo presenta el proceso metodológico seguido para la elaboración de un mapa sanitario digital de las Áreas de Salud y Zonas Básicas de Salud que contiene información georreferenciada unificada para todo el territorio nacional.

Palabras-clave: Planificación en Salud, Cartografía, Sistemas de Información Geográfica

1. INTRODUCCIÓN

Las administraciones necesitan conocer el estado de salud de la población y los factores que la condicionan para responder a riesgos actuales y futuros de salud pública, así como para orientar actuaciones encaminadas a reducir las desigualdades en salud (OMS, 2017). Para ello es fundamental disponer de datos y sistemas de información que permitan identificar prioridades en la gestión de problemas de salud, utilizar los recursos eficientemente y verificar los avances en el cumplimiento de los planes de salud a todas las escalas. En el conjunto de datos relacionados con la salud, la información geográfica tiene un valor estratégico para múltiples objetivos de las políticas sanitarias. La integración de datos geográficos en los Sistemas de Información Geográfica (SIG) es fundamental para proporcionar información que permita a los distintos agentes, como políticos, planificadores, gestores, epidemiólogos y profesionales de la salud, tomar decisiones correctas y pertinentes entre las diferentes alternativas disponibles (Tamborero-Cao, 2008). Los SIG, diseñados para modelar, analizar y representar información geográfica, son programas que proporcionan datos e información muy útiles para la planificación, gestión y evaluación de la sanidad pública (Cromley & McLafferty, 2012).

Los mapas sanitarios son representaciones de las delimitaciones territoriales en las que se registran los eventos agregados de la salud humana (variaciones del estado fisiológico o sanitario de individuos dentro de una población) y se consideran instrumentos esenciales para planificar y gestionar servicios sanitarios, evaluar las políticas sanitarias y también para investigar en epidemiología y salud (Kirby et al., 2017). Además

de permitir la identificación y caracterización de patrones de distribución y difusión espacial de enfermedades, posibilitan la identificación de factores contextuales del área geográfica con implicaciones sobre la salud, lo que resulta de gran utilidad a la hora de priorizar actuaciones de prevención y manejo de la enfermedad en las áreas de mayor riesgo (Borrell & Pasarín, 2004).

En España, conforme a lo establecido en la Ley 14/1986, de 25 de abril, General de Sanidad, las competencias en la delimitación de las unidades básicas de gestión sanitaria (Áreas de Salud y Zonas Básicas de Salud) quedan atribuidas a las comunidades autónomas (CCAA). Los diferentes criterios organizativos de la atención sanitaria en las CCAA han dado lugar a lo largo del tiempo en diferentes adaptaciones de las Áreas de salud en cuanto a nomenclatura y tamaño. A esto se suma que, si bien el concepto de ZBS se ha mantenido más uniforme, sus demarcaciones territoriales están sujetas a los constantes cambios y actualizaciones de los mapas sanitarios de cada CCAA (Ministerio de Sanidad, 2022). Esta descentralización ha dificultado la elaboración de un mapa sanitario oficial y unificado de todo el territorio nacional (que, de hecho, no existe en su versión oficial y pública), y ha supuesto importantes limitaciones a la hora de homogeneizar la información sanitaria, tal y como se evidenció durante la crisis de la COVID 19. Estas limitaciones tal vez expliquen que la mayoría de los estudios en España en los que se recurre a la ZBS para documentar las formas en que los procesos basados en el lugar de residencia influyen en la salud se hayan limitado al ámbito autonómico (Domínguez-Berjón et al., 2014). Sin embargo, estos estudios presentan un elevado potencial para comprender el comportamiento espacial de los resultados en salud y sus determinantes.

En este trabajo se parte de la premisa de que disponer de un mapa sanitario unificado de todo el territorio nacional es fundamental tanto para llevar a cabo estudios como para desarrollar sistemas de información para la vigilancia en salud pública que agilicen el proceso mediante el que los datos se traducen en orientaciones técnicas y garanticen a la ciudadanía el acceso a la información sanitaria. Ridao-López et al. (2018) realizaron un trabajo previo de delimitación de ZBS en España, pero su actualización no se corresponde con la estructura actual. El objetivo del presente trabajo es presentar el procedimiento metodológico empleado en la elaboración de un mapa sanitario digital de las Áreas de Salud y Zonas Básicas de Salud que contiene información georreferenciada unificada para todo el territorio nacional.

2. METODOLOGÍA

Para la elaboración del mapa de las Áreas de Salud y ZBS del territorio nacional se emplearon datos procedentes de diferentes fuentes con variaciones en su calidad, actualización y formato. Estos datos se revisaron y completaron para finalmente organizarse en una base de geodatos lógica y espacialmente coherente. Para ello, se siguieron las etapas que se detallan a continuación.

2.1. Definición de las Áreas de Salud y las ZBS

En primer lugar, se definieron las Áreas de Salud y las ZBS conforme a lo expresado en la Ley 14/1986, de 25 de abril, General de Sanidad. Esta Ley define las Áreas de Salud en su artículo 56 como «las estructuras fundamentales del sistema sanitario, responsabilizadas de la gestión unitaria de los centros y establecimientos del Servicio de Salud de la Comunidad Autónoma en su demarcación territorial y de las prestaciones y programas sanitarios a desarrollar por ellos». A efectos organizativos de la Atención Primaria, se trata de «las circunscripciones administrativas que agrupan un conjunto de centros y de profesionales de atención primaria bajo su dependencia organizativa y funcional» (Ministerio de Sanidad, 2024).

En el Artículo 62 se establece que «las Áreas de Salud se dividirán en Zonas Básicas de Salud, debiendo tener en cuenta en su delimitación diferentes criterios sobre accesibilidad a servicios en distancia y tiempo, el grado de concentración o dispersión de la población, las características epidemiológicas y las instalaciones y recursos sanitarios de la zona». Asimismo, el artículo 63 define las ZBS como «el marco territorial de la atención primaria de salud donde desarrollan las actividades sanitarias los Centros de Salud, centros integrales de atención primaria». Estos criterios llevan a que en algunos casos se configuren como una unidad espacial mixta: en los municipios de mayor tamaño, generalmente capitales provinciales, agrupan secciones censales, mientras que en el resto del territorio la agregación es municipal.

2.2. Obtención de información para la delimitación de las Áreas de Salud y ZBS

En segundo lugar, se acudió a portales de información estadística, geográfica o sanitaria de las CCAA para identificar bases espaciales de Áreas de Salud y ZBS disponibles para su descarga en formato vectorial. En caso de estar disponibles, se descargaron, se verificaron los datos, y en algunos casos se completaron o corrigieron errores tomando como referencia el Mapa de referencia para el Sistema de Información de Atención Primaria (SIAP) del Ministerio de Sanidad (Ministerio de Sanidad, 2022).

La digitalización de las Áreas de Salud y ZBS de las CCAA en las que no se encontró información en formato *.shp* (caso de Canarias, La Rioja, Ceuta y Melilla y las ZBS de Galicia) se apoyó en la base de Ridao-López et al (2018). Esta base se editó adaptando los límites que se establecen en la normativa autonómica vigente utilizando las bases espaciales de municipios y secciones censales procedentes del del Instituto Geográfico Nacional y del Instituto Nacional de Estadística. En Ceuta y Melilla no se encontró información suficiente como para realizar una delimitación precisa de las ZBS, de modo que se trabajó a nivel de Área de Salud. En la Tabla 1 se presentan las fuentes de información utilizadas en cada caso.

Tabla 1. Disponibilidad de información vectorial de Áreas de Salud y ZBS fuentes de información utilizadas para la construcción de la base espacial por CCAA.

Comunidad autónoma	Fuentes de información para empleadas para la delimitación de las Áreas de Salud y ZBS
Andalucía	Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía
Aragón	Infraestructura de Conocimiento Espacial de Aragón
Principado de Asturias	Portal de Salud del Principado de Asturias
Illes Balears	Infraestructura de Datos Espaciales de Illes Balears
Canarias	Infraestructura de Datos Espaciales de Canarias y base espacial de Ridao-López et al. (2018)
Cantabria	Web de la Consejería de Fomento, Ordenación del Territorio y Medio Ambiente del Gobierno de Cantabria
Castilla y León	Infraestructura de Datos Espaciales de Castilla y León
Castilla-La Mancha	Portal de Datos Geográficos Abiertos de Castilla-La Mancha
Cataluña	Web del Departamento de Salud de Cataluña
Comunidad Valenciana	Portal de datos abiertos de la Generalitat Valenciana
Extremadura	Infraestructura de Datos Espaciales de Extremadura
Galicia	Web del Servicio Gallego de Salud y base espacial de Ridao-López et al. (2018)
Comunidad de Madrid	Portal de Datos Abiertos e Instituto de Estadística de la Comunidad de Madrid
Región de Murcia	Portal Sanitario de la Región de Murcia
C. Foral de Navarra	Infraestructura de Datos Espaciales de Navarra
País Vasco	Portal de Datos Abiertos del Gobierno Vasco
La Rioja	Normativa autonómica y base espacial de Ridao-López et al. (2018)
Ceuta y Melilla	Base espacial municipal del Instituto Geográfico Nacional

2.3. Geocodificación para la estructuración de la información

Una vez delimitadas las Áreas de Salud y ZBS se trabajó en la estructuración y geocodificación de la información. Los campos de la tabla de atributos en los que se estructuró la base espacial fueron los siguientes: (i) cuatro campos que conservaban la toponimia y codificación original de las Áreas de Salud y ZBS ("cod_area", "nom_area", "cod_zbs", "nom_zbs"); (ii) cuatro campos correspondientes con los nombres y códigos autonómicos y provinciales del Instituto Nacional de Estadística ("cod_ca", "nom_ca", "cod_prov", "nom_prov", y (iii) dos nuevos campos con un nuevo código de Área de Salud y ZBS creado a partir de la concatenación de los códigos de CA, provincia, y el código original ("cod_area2", y "cod_zbs2"). De este modo se consiguió conservar la codificación original de las entidades espaciales posibilitando al mismo tiempo su identificación unívoca.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 1 se presenta el mapa resultante de la delimitación de las Áreas de Salud y las ZBS en 2022. Se identificaron 169 Áreas de Salud y 2.707 ZBS, con tamaños de población y extensión superficial muy variables entre CCAA y en el interior de estas. Los mapas de las capitales provinciales permiten ilustrar diferencias en la estructura organizativa de la atención sanitaria entre CCAA que reflejan particularidades en la distribución de la población y el poblamiento. Solo las capitales gallegas, extremeñas y andaluzas cuentan con una única ZBS que agrupa prácticamente todas las secciones censales del municipio. En el resto, las secciones

quedan agrupadas en diferentes ZBS (pudiendo ser más de 60 en Barcelona o de 130 en Madrid). Estas particularidades también se reflejan en la Tabla 2, en la que se presentan los rangos de población mínimos y máximos observados en las ZBS según los datos del Censo de Población y Viviendas de 2021. En Galicia, Extremadura y Andalucía aparecen las ZBS de con mayor tamaño de población, frente a las ZBS de Asturias, Castilla y León, Castilla-La Mancha y Aragón (y también de Galicia), con un tamaño poblacional mínimo inferior a 600 habitantes. Las diferencias en la extensión superficial no son tan marcadas, aunque sí destacan por su superficie mínima las ZBS de Galicia, Extremadura y Andalucía (en Andalucía, la quinta con menor superficie es de 12 km²). En el resto, la extensión mínima promedio es similar, tratándose en todos los casos de una ZBS urbana constituida a partir de secciones censales. Los tamaños superficiales máximos también reflejan realidades territoriales como la elevada dispersión demográfica por la que se caracterizan CCAA como Castilla y León, Castilla-La Mancha y Aragón, con las consiguientes implicaciones que esto conlleva en términos de accesibilidad a equipamientos estructurantes básicos como los centros de salud.

Uno de los aspectos más relevantes que conviene volver a señalar es que esta delimitación queda sujeta a los cambios y actualizaciones de los mapas sanitarios de las CCAA. De hecho, la estructura organizativa de la atención primaria actual ya es diferente a la presentada en el mapa. En la Tabla 2 se presenta la comparación entre el número de Áreas de Salud y ZBS en 2022 y 2024 según la información que publica el Ministerio de Sanidad a través del Sistema de Información de Atención Primaria. En este periodo dos CCAA han modificado la delimitación de las Áreas de Salud (Andalucía y País Vasco), y seis las ZBS (Aragón, Castilla-La Mancha, Cataluña, Comunidad Valenciana, Comunidad de Madrid y en el País Vasco), pasando de identificarse un total de 2.707 ZBS en 2022 a 2.716 ZBS en 2024. Este hecho subraya la necesidad de que desde la administración se desarrolle un mecanismo que permita centralizar la gestión de esta información y que garantice tanto la disponibilidad de la información como su usabilidad con el fin de que diferentes usuarios puedan utilizarla y aprovechar su potencial (Park & Gil-García, 2022).

Tabla 2. Fuentes de información de referencia para la construcción de la base espacial.

Comunidad autónoma	Población ZBS (mínimo-máximo)	Superficie ZBS (km ²) (mínimo-máximo)	Áreas 2022	Áreas 2024	ZBS 2022	ZBS 2024
Andalucía	2.839 – 684.340	1 – 1.797	34	33	216	216
Aragón	574 – 39.361	0,4 – 1.258	8	8	123	124
Principado de Asturias	320 – 31.057	0,4 - 824	8	8	70	70
Illes Balears	6.415 – 43.851	0,5 - 332	3	3	61	61
Canarias	1.597 – 48.822	0,6 – 396	7	7	108	108
Cantabria	1.111 – 25.185	0,6 – 1.011	4	4	42	42
Castilla y León	420 – 47.657	0,6 – 1.377	11	11	249	249
Castilla-La Mancha	103 – 67.688	0,3 - 2.343	14	14	205	204
Cataluña	2.598 – 50.917	0,3 – 1.381	7	7	370	374
Comunidad Valenciana	1.435 – 83.740	0,6 - 980	24	24	241	242
Extremadura	1.122 – 163.727	16 - 1871	8	8	113	113
Galicia	513 – 294.650	8 - 908	7	7	314	314
Comunidad de Madrid	2.805 – 68.111	0,2 – 549	7	7	286	285
Región de Murcia	3.399 – 37.544	0,3 - 972	9	9	90	90
C. Foral de Navarra	1.098 – 26.153	0,8 - 843	3	3	56	58
País Vasco	2.814 – 39.862	0,2 - 491	12	13	136	139
La Rioja	242 – 34.104	0,3 - 1013	1	1	20	20
Ceuta y Melilla	Total (84.071 y 85.386)	20,4 y 14,1	2	2	7	7

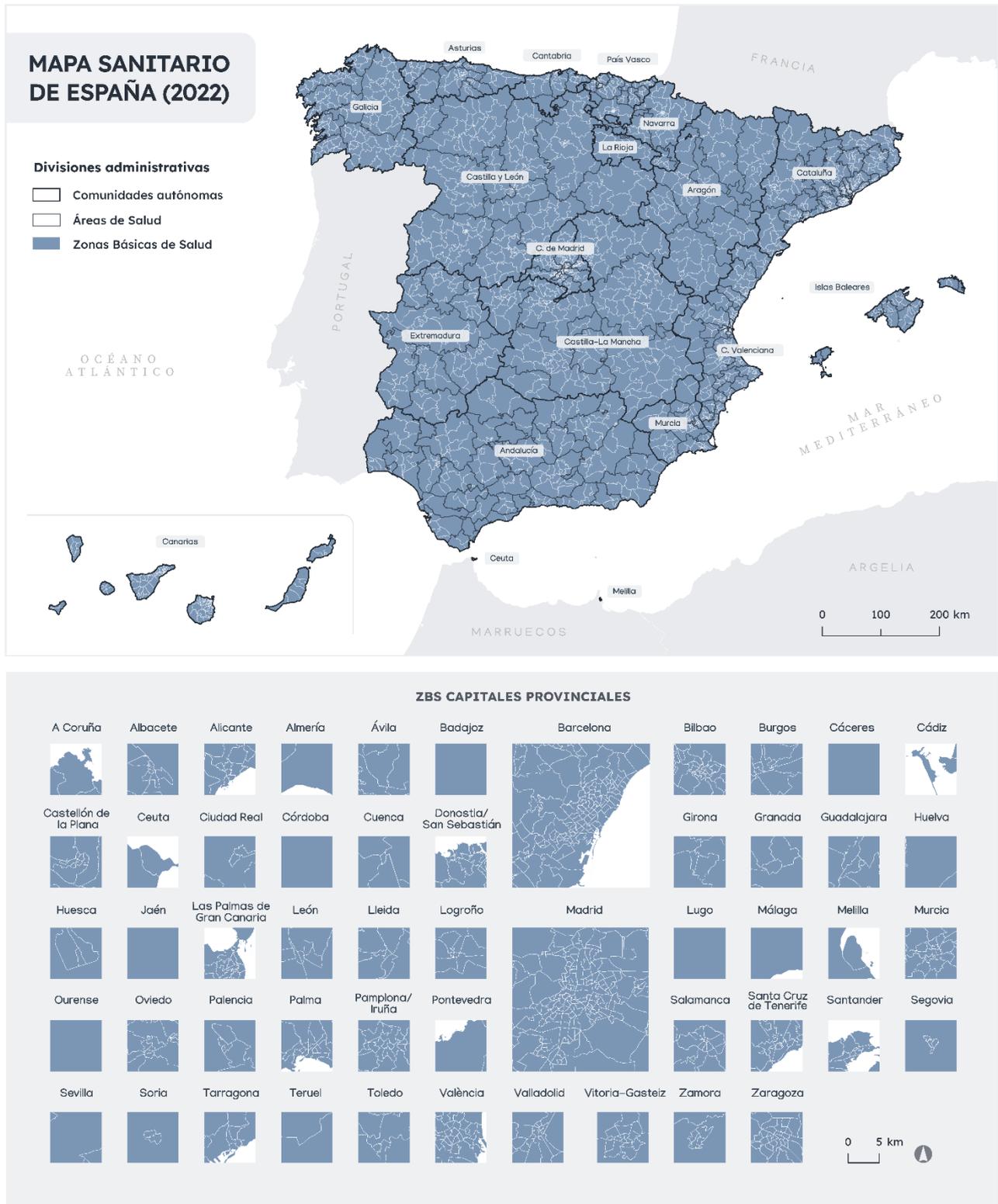


Figura 6. Mapa Sanitario de España (2022). Delimitación territorial de las Áreas de Salud y ZBS.

Las variaciones geográficas en la salud y en el acceso a la salud pueden explicarse en parte por los recursos sociales, económicos y sanitarios que dispone cada región (Ministerio de Sanidad, 2015). Por este motivo la utilización de la localización en el análisis y la comprensión de los fenómenos sanitarios es esencial para una planificación acorde con las necesidades locales (Souris, 2019). El principal desafío que enfrenta la organización territorial de la asistencia sanitaria es alcanzar una zonificación óptima que equilibre la eficiencia y la equidad en la dotación y el acceso a los recursos. En este sentido, resulta fundamental considerar las

características tanto de la población como del área geográfica en la que se enmarcan las personas como soporte metodológico a partir del que tomar decisiones encaminadas a la reducción de las desigualdades en el acceso a la salud (Aguilar-Palacio, 2015).

La utilización de la ZBS como unidad geográfica de análisis se justifica por el hecho de constituir el marco de referencia de la atención sanitaria y por tratarse por tanto del nivel de base para la realización de intervenciones por parte de los equipos de atención primaria y su posterior evaluación (Rabanaque-Hernández, 2019). Pero, además, su uso resulta ventajoso porque es la escala a la que frecuentemente se publica información sanitaria en los sistemas información autonómicos y a la que generalmente se proporcionan datos individuales agregados a nivel de población, lo cual facilita el proceso de obtención de información y garantiza la comparabilidad y replicabilidad de los protocolos desarrollados en otros ámbitos de estudio.

4. CONCLUSIONES

Las diferentes capacidades y formas de elaborar los mapas sanitarios de cada comunidad autónoma han dificultado la elaboración y publicación de un mapa sanitario oficial y actualizado a escala nacional, un hecho que limita el aprovechamiento del potencial de la información que se genera dentro y fuera del sistema sanitario. La información geográfica (espacial, temporal y temática) es estratégica para la planificación, gestión y evaluación de los recursos de la sanidad pública, así como lo es su análisis y representación cartográfica. En el presente trabajo se ha conseguido elaborar un mapa continuo de las áreas de Salud y Zonas Básicas de Salud de todo el territorio nacional aprovechando información de diferentes portales de información geográfica y sanitaria, con diferencias en su calidad, actualización y formato. Se considera prioritaria la búsqueda de soluciones en la centralización de la gestión de la información sobre la delimitación territorial de las Áreas de Salud y las ZBS en España y la garantía de su disponibilidad y usabilidad.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar-Palacio, I. (2015). Desigualdades en la distribución de salud y enfermedad: la influencia de factores socioeconómicos [Tesis Doctoral]. Universidad de Zaragoza.
- Borrell, C., & Pasarín, M. I. (2004). Desigualdad en salud y territorio urbano. *Gaceta Sanitaria*, 18(1), 01-04.
- Cromley, E. K., & McLafferty, S. (2012). *GIS and public health (2nd ed)*. The Guilford Press.
- Domínguez-Berjón, M. F., Rodríguez-Sanz, M., Marí-Dell'Olmo, M., Esnaola, S., Prieto-Salceda, M. D., Duque, I., & Rodrigo, M. P. (2014). Uso de indicadores socioeconómicos del área de residencia en la investigación epidemiológica: experiencia en España y oportunidades de avance. *Gaceta Sanitaria*, 28, 418-425. <https://doi.org/10.1016/j.gaceta.2014.04.011>
- Gordon, A., & Womersley, J. (1997). The use of mapping in public health and planning health services. *Journal of Public Health*, 19(2), 139-147. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.pubmed.a024601>
- Kearns, F. R., Kelly, M., & Tuxen, K. A. (2003). Everything happens somewhere: using webGIS as a tool for sustainable natural resource management. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 1(10), 541-548. [https://doi.org/10.1890/1540-9295\(2003\)001\[0541:EHSUWA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1540-9295(2003)001[0541:EHSUWA]2.0.CO;2)
- Kirby, R. S., Delmelle, E., & Eberth, J. M. (2017). Advances in spatial epidemiology and geographic information systems. *Annals of Epidemiology*, 27(1), 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.annepidem.2016.12.001>
- Luan, H., & Law, J. (2014). Web GIS-based public health surveillance systems: a systematic review. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 3(2), 481-506. <https://doi.org/10.3390/ijgi3020481>
- Ministerio de Sanidad, Servicios Sociales e Igualdad (2015). *Avanzando hacia la equidad. Propuesta de políticas e intervenciones para reducir las desigualdades sociales en salud en España*.
- Ministerio de Sanidad (2022). *Ordenación Sanitaria del Territorio en las Comunidades Autónomas. Mapa de referencia para el Sistema de Información de Atención Primaria (SIAP). Año 2022*.
- Organización Mundial de la Salud (2017). *WHO guidelines on ethical issues in public health surveillance*. Washington, D.C. Pan American World Health Organization.
- Park, S., & Gil-García, J. R. (2022). Open data innovation: Visualizations and process redesign as a way to bridge the transparency-accountability gap. *Government information quarterly*, 39(1), 101456. <https://doi.org/10.1016/j.giq.2020.101456>

- Souris, M. (2019). *Épidémiologie et géographie, principes, méthodes et outils de l'analyse spatiales*. ISTE Editions Ltd.
- Rabanaque-Hernández, I. (2021). *Variabilidad espacial de la salud mental en Aragón y análisis de su asociación con el nivel socioeconómico: prevalencia de deterioro cognitivo leve y demencia* [Tesis Doctoral]. Universidad de Zaragoza.
- Ridao-López, M., Estupiñán-Romero, F., Martínez-Lizaga, N., Seral-Rodríguez, M., Angulo-Pueyo, E., Comendeiro-Maaløe, M., Launa-Garcés, R., & Bernal-Delgado, E. (2018). Mapa georreferenciado de las zonas básicas de salud de España. Año 2017. [Data set] <https://doi.org/10.5281/zenodo.1256149>
- Tamborero Cao, G. (2008). ¿Es útil para la atención primaria un sistema de información de base poblacional? *Atención primaria*, 40(4), 174.

2000-2018: veinte años de transformaciones en los usos del suelo en zonas en despoblación. Los ejemplos de Soria y Teruel.

D. Cocero Matesanz¹, M. Gallardo Beltrán¹ y J. Fernández Portela¹

¹ Departamento de Geografía, Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED). Paseo de la Senda del Rey 7, 28040 Madrid.

dcocero@geo.uned.es, <https://orcid.org/0000-0002-1274-1530>

martagallardo@geo.uned.es, <https://orcid.org/0000-0003-4804-710X>

jfportela@geo.uned.es, <https://orcid.org/0000-0002-1677-8103>

RESUMEN: El interés en el estudio y el análisis de los cambios en los usos del suelo ha crecido considerablemente debido a su importancia para entender las dinámicas globales. La mayoría de las investigaciones se han enfocado en el crecimiento urbano, la deforestación y la intensificación de la agricultura. Sin embargo, los cambios en los usos del suelo en áreas con despoblación aún no son muy numerosos. Este trabajo presenta un análisis comparativo de los cambios en los usos del suelo en dos provincias españolas afectadas por un importante proceso de despoblación, Soria y Teruel, entre 2000 y 2018. Para ello se utiliza la base de datos *Corine Land Cover*, generando estadísticas descriptivas y localizando geográficamente los cambios observados. Se detecta que ambas provincias presentan patrones similares, con un crecimiento urbano moderado en comparación con la tendencia nacional, y donde la principal transformación es la naturalización de tierras agrícolas. Los resultados pretenden facilitar el análisis de la relación entre estos cambios y sus factores explicativos, con el objetivo de impulsar el necesario debate sobre la gestión territorial en estas zonas.

Palabras-clave: Cambios usos de suelo, *CORINE Land Cover*, Soria, Teruel, medio rural.

1. SORIA Y TERUEL: DOS PROVINCIAS EN DESPOBLACIÓN

En las últimas décadas, en Europa se está produciendo un abandono de la superficie cultivada como consecuencia de cambios sociales, económicos y culturales, lo que ha propiciado un importante éxodo rural y la pérdida de prácticas tradicionales (Levers et al., 2018; Otero et al., 2015). En España, hay estudios que resaltan la conexión entre abandono de tierras y despoblación rural, especialmente en áreas montañosas o en la meseta central (Serra et al., 2014). Zonas donde dominan los trabajadores del sector primario, los municipios con pocos habitantes y una alta tasa de envejecimiento. Esta despoblación y sus impactos han sido motivo de preocupación tanto para la comunidad científica como para los políticos durante años. Además, el problema se ha agravado con el tiempo en regiones como Castilla y León (López, 2007; Rico, 2020) y Aragón (Frutos et al., 1994; Palacios et al., 2017), donde se ubican las dos provincias objeto de este estudio.

La densidad de población afecta directamente al desarrollo socioeconómico de un territorio, creando contrastes evidentes: las áreas con mayor densidad de población cuentan con mejores servicios e infraestructuras, mientras que las zonas muy despobladas, envejecidas y con escasa accesibilidad a servicios presentan una notable carencia de infraestructuras (Vidal y Fernández, 2022). Esto dificulta el acceso a servicios básicos, afectando a poblaciones rurales e incluso a algunas áreas urbanas y capitales provinciales, que carecen de servicios esenciales, como especialidades médicas, oferta educativa o actividades de ocio. Lejos de solucionarse, estos problemas empeoran con el paso del tiempo, lo que provoca una mayor pérdida de población, envejecimiento, reducción de la población activa y una menor diversificación laboral, lo que lleva el abandono de estas zonas. Estos procesos generan cambios en los usos del suelo, tanto en zonas rurales como urbanas. En las áreas rurales, los cambios más comunes incluyen la naturalización de grandes extensiones de territorio, con el abandono de cultivos y pastos, la falta de gestión forestal, la pérdida de paisajes y tradiciones, la disminución de la biodiversidad, el incremento de la erosión y el aumento de incendios forestales.

Por ello, el objetivo de este trabajo es analizar las dinámicas de cambio en los usos del suelo en Soria y Teruel entre los años 2000 y 2018. Se trata de las provincias españolas que más población han perdido en los últimos 120 años, con una disminución del 40% en el caso de Soria y de casi un 46% en el caso de Teruel, siendo el caso más extremo de todo el país, pues ha dividido prácticamente su población por dos.

2. METODOLOGÍA

Para realizar el análisis de los cambios en los usos del suelo en ambas provincias se utilizó la base de datos *CORINE Land Cover*. Elaborada a nivel europeo, ha sido ampliamente empleada y facilita el estudio de varios periodos temporales (desde 1990 hasta 2018), proporcionando una cartografía relativamente estandarizada. Esto permite realizar comparaciones tanto temporales como espaciales de las dinámicas de cambio en distintos territorios (Gallardo y Cocero, 2023). Para este estudio se han empleado los datos correspondientes a los años 2000 y 2018, que fueron descargados gratuitamente del Centro de Descargas del Centro Nacional de Información Geográfica del Instituto Geográfico Nacional de España.

Después de analizar los cambios utilizando el mayor nivel de detalle temático de *CORINE* (28 categorías de usos del suelo en Soria y 33 en Teruel), se optó por reclasificar estos datos para generar estadísticas sobre los procesos de cambio más relevantes. Las categorías de usos del suelo seleccionadas fueron las siguientes: tejido urbano, otros usos artificiales, tierras de labor en secano, terrenos regados permanentemente, viñedos, frutales, pastos, olivares, mosaicos de cultivos, terrenos agrícolas con vegetación natural, sistemas agroforestales, bosques, pastizales naturales, matorrales, espacios abiertos con poca o sin vegetación, zonas quemadas y superficies de agua. A partir de esta nueva clasificación se elaboraron matrices de tabulación cruzada para obtener estadísticas relacionadas con superficie, ganancias, pérdidas, intercambios, cambio neto y cambio total (Pontius et al., 2004). Para la cartografía de los cambios se utilizó el nivel de detalle más general (nivel 1) de *CORINE*, que incluye cuatro categorías: superficies artificiales, zonas agrícolas, zonas forestales con vegetación natural y espacios abiertos, y superficies de agua. Los softwares empleados para obtener las estadísticas y realizar la cartografía fueron ArcGis 10.2, IDRISI TerrSet 18 y Microsoft Excel.

3. ÁREA DE ESTUDIO

El trabajo se centra en Soria y Teruel, provincias situadas en las comunidades autónomas de Castilla y León y Aragón, respectivamente. Son las menos pobladas de España y, a su vez, figuran entre las NUTS 3 (Nomenclatura Común de Unidades Territoriales Estadísticas) de Europa con menor densidad de población, comparables a regiones como Laponia y Kainuu en Finlandia, o Nordland y Oppland en Noruega. En el año 2000, la densidad de población en Soria era de 8,8 hab./Km², muy por debajo de la media europea (111,9 hab./Km²), una densidad casi trece veces inferior a la del conjunto europeo y nueve veces menor que la de España. Teruel presentaba una situación similar, con una densidad de 9,2 hab./Km². Ambas provincias figuraban en el año 2000 entre las veinte NUTS 3 menos pobladas, de un total de 1442 regiones europeas.

En el año 2018 Soria tenía una densidad de 8,7 hab./Km² y Teruel de 9 hab./Km², manteniéndose con las cifras más bajas de toda Europa meridional (Rubio, 2022), con municipios que registraban una densidad de población inferior a 1 hab./Km², un patrón común en varias localidades tanto de Soria como de Teruel, lo que ha llevado a algunos autores a referirse a estas zonas como la "Laponia española" (Cerdá, 2019). En el interior peninsular español muchas zonas tienen densidades inferiores a 5 hab./Km², como ocurre en la mayoría de los municipios de las dos provincias (Figura 1). En Soria, el 71% de los municipios tienen menos de 5 hab./Km², un total de 169. En ellos, la población ha disminuido, pasando de 90.911 habitantes en 2000 a 88.600 en 2018, lo que representa una reducción del 2,54%. La capital, Soria, es el municipio más grande y ha visto un aumento en su población, atrayendo a parte de los residentes que abandonaron las zonas rurales. En el año 2000, la capital concentraba el 37,5% de la población, cifra que aumentó al 44,14% en 2018.

En la provincia de Teruel, el 83,7% de los municipios tienen menos de 5 hab./Km², un total de 154. Esta provincia cuenta con 234 municipios y una población de 134.572 habitantes en 2018, lo que supone un descenso del 1,39% respecto al año 2000. La población urbana, que se concentra en solo dos localidades (Teruel y Alcañiz), representa el 38,37% del total, con un incremento del 6,41% con respecto al año 2000. Este aumento refleja, al igual que en Soria, una tendencia hacia la concentración de la población en áreas urbanas, donde la calidad de vida es mejor, hay más comodidades y mayor accesibilidad a los servicios.

4. RESULTADOS

4.1. Cambios de usos del suelo en Soria y Teruel

La Tabla 1 muestra las hectáreas ocupadas por los distintos usos del suelo en los años 2000 y 2018, tanto en Soria como en Teruel. En ambos casos, las mayores áreas están ocupadas por tierras de labor en seco. En Soria, estas tierras aumentaron del 33% al 36%, mientras que en Teruel disminuyeron del 26% al 23%. Los bosques, en el año 2018, cubren un 31% de la superficie de Soria y un 28% de la de Teruel, habiendo experimentado un crecimiento en ambas provincias desde el año 2000. Los matorrales, por su parte, han registrado pérdidas significativas, reduciéndose del 22% al 16% en Soria y del 32% al 29% en Teruel.

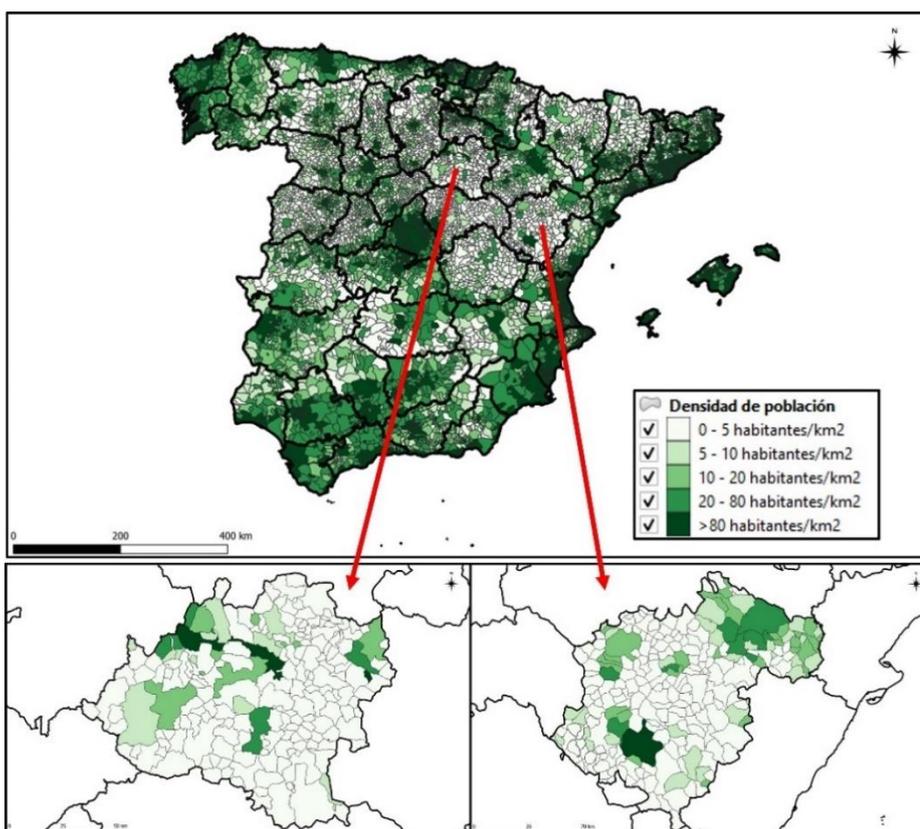


Figura 1. Densidad de población en Soria y Teruel en el año 2021 (fuente: INE-Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Elaboración propia).

Asimismo, en ambas provincias se han observado pérdidas importantes en los mosaicos de cultivos. En Soria, los terrenos agrícolas con vegetación natural han disminuido notablemente, mientras que en Teruel han aumentado ligeramente. Además, en Teruel se ha producido un aumento importante en la superficie dedicada a frutales y olivares, mientras que, en Soria, estos cultivos comenzaron a aparecer a partir del año 2000. En cuanto a los pastizales naturales, las dinámicas son diferentes en cada provincia: en Soria se ha registrado un aumento significativo, mientras que en Teruel el descenso ha sido leve.

Tabla 1. Superficie ocupada en hectáreas por diferentes usos del suelo en Soria y en Teruel en los años 2000 y 2018 (fuente: Datos extraídos de *CORINE Land Cover*. Elaboración propia).

Usos del suelo	Soria		Teruel	
	2000	2018	2000	2018
Tejido urbano	705	1.902	2.766	3.997
Otros usos artificiales	594	2.239	3.816	6.790
Tierras de labor en seco	346.602	371.782	386.034	347.080
Terrenos regados permanentemente	18.620	20.472	34.662	35.387
Viñedos	1.262	1.689	2.799	1.322

Frutales	0	159	3.083	11.881
Pastos	5.220	4.300	6.938	13.992
Olivares	0	0	554	5.448
Mosaicos de cultivos	17.412	3.175	93.517	51.413
Terrenos agrícolas con vegetación natural	88.973	20.270	71.233	80.729
Sistemas agroforestales	1.207	224	0	26
Bosques	248.659	321.009	329.558	415.326
Pastizales naturales	59.309	110.896	67.255	58.945
Matorrales	233.706	165.003	467.067	436.278
Espacios abiertos con poca o sin vegetación	3.045	4.358	9.704	9.885
Zonas quemadas	2.409	0	62	0
Superficies de agua	2.190	2.436	2.019	2.567

Los usos urbanos y artificiales han experimentado un crecimiento en ambas provincias. En Soria, la superficie ocupada por el tejido urbano ha aumentado del 0,07% al 0,18%, y, en Teruel, del 0,19% al 0,27%. Otros usos artificiales (que incluyen zonas industriales, comerciales, de transporte, áreas de extracción minera, vertederos y espacios verdes artificiales) también han crecido, pasando del 0,06% al 0,22% en Soria, y del 0,26% al 0,46% en Teruel. Sin embargo, este aumento de superficies artificiales tiene lugar a un ritmo mucho más lento en comparación con la media nacional.

Los usos del suelo que se han mantenido relativamente estables, con pequeños cambios en las cifras, incluyen los terrenos de riego permanente, los viñedos (aunque en Teruel se ha registrado un descenso), los pastos (con un crecimiento más acusado en Teruel), los sistemas agroforestales, los espacios abiertos con poca o sin vegetación y las superficies de agua. Estos cambios se reflejan de manera más detallada en la Figura 2, que muestra las superficies de ganancias y pérdidas de cada uso del suelo analizado. Los colores rojos indican las dinámicas correspondientes a la provincia de Soria, mientras que los azules representan las de la provincia de Teruel. Las mayores pérdidas están asociadas a los matorrales, seguidas de las tierras de labor en seco y los mosaicos de cultivos en Teruel, mientras que en Soria destacan las pérdidas en los terrenos agrícolas con vegetación natural y las tierras de labor en seco. En cuanto a las mayores ganancias de superficie, se registran en los bosques, seguidos en Teruel por los matorrales y los terrenos agrícolas con vegetación natural, mientras que en Soria destacan las tierras de labor en seco y los pastizales naturales.

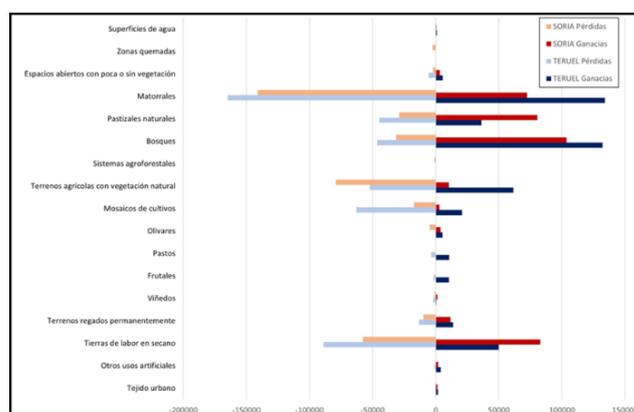


Figura 2. Ganancias y pérdidas de usos del suelo durante el periodo 2000-2018 (fuente: Datos extraídos de CORINE Land Cover. Elaboración propia).

4.2. Localización geográfica de los cambios de usos del suelo en Soria y Teruel

En cuanto a la localización de los principales cambios en los usos del suelo, las dinámicas más relevantes (como la transformación de zonas agrícolas a forestales con vegetación natural, y viceversa) están distribuidas de manera relativamente uniforme por todo el territorio de ambas provincias (Figura 3). En Soria, se observan áreas convertidas en usos agrícolas cerca de la capital, al norte de la misma, pero también al sur y suroeste de la provincia, casi en el límite con Guadalajara. El aumento de zonas forestales con vegetación natural a partir de zonas agrícolas ha sido más notable en el norte de la provincia, así como en el suroeste, alrededor de San Esteban de Gormaz, y en el sureste, cerca de Morón de Almazán. Las superficies artificiales han reemplazado áreas de cultivo en los municipios de Soria, Burgo de Osma y Almazán, los más poblados

de la provincia, donde se han construido polígonos industriales y un centro comercial, entre otros desarrollos.

En Teruel, el aumento de tierras agrícolas se ha concentrado en el norte, el centro y el este, en la zona del Maestrazgo. La cubierta forestal ha ocupado áreas también al norte, cerca de Zaragoza, y en los alrededores de Alcañiz, en la zona central cerca de Utrillas, así como en el este provincial. El crecimiento de superficies artificiales a costa de tierras agrícolas se ha dado principalmente en los municipios de Teruel y Alcañiz, las localidades más pobladas. Un caso destacado es la construcción del Aeropuerto de Teruel en 2007, junto con desarrollos en las cercanías de La Puebla de Valverde y en las comarcas de Andorra y las Cuencas Mineras.

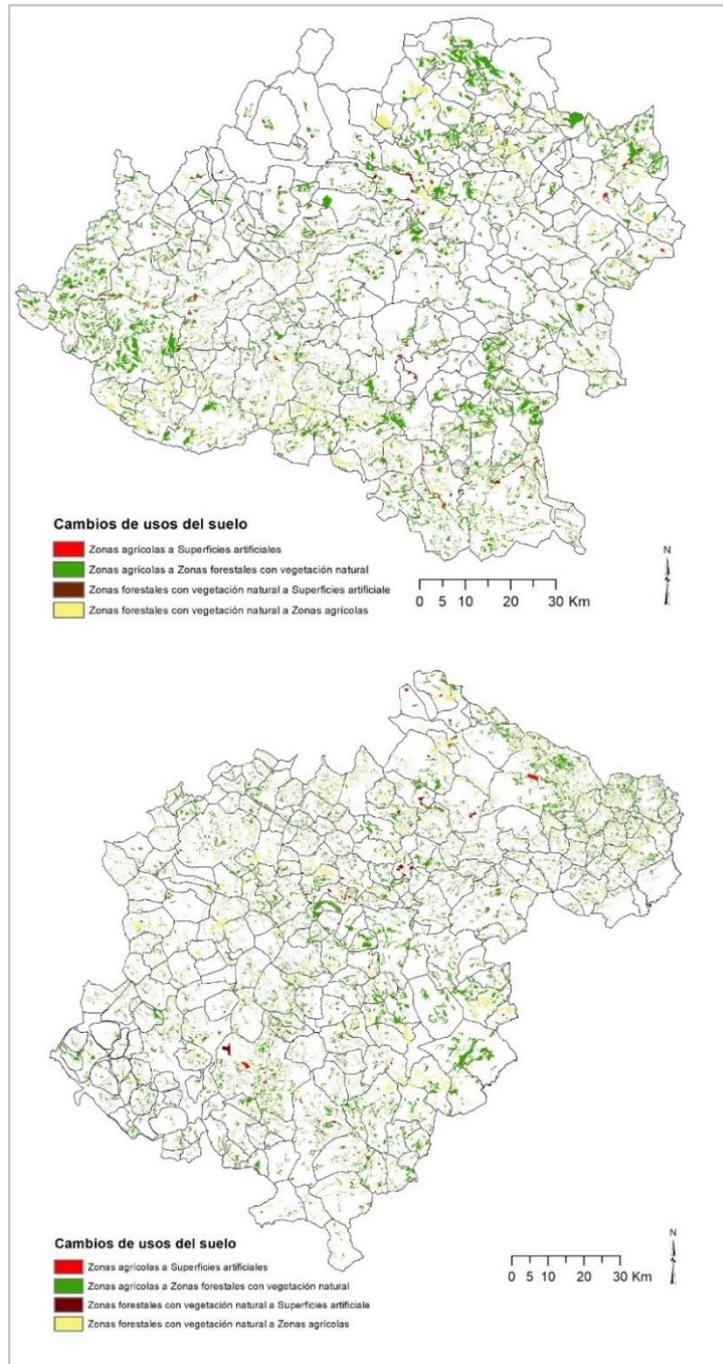


Figura 3. Principales cambios de usos del suelo registrados en Soria (superior) y Teruel (inferior) durante el periodo 2000-2018 (fuente: Datos extraídos de *CORINE Land Cover*. Elaboración propia).

5. CONCLUSIONES

Entre los años 2000 y 2018, las provincias de Soria y Teruel han experimentado transformaciones significativas en los usos del suelo, marcadas por el proceso de despoblación y el abandono de tierras rurales. Durante este periodo, los principales cambios observados incluyen una notable disminución de las áreas agrícolas, acompañada de un aumento de los procesos de naturalización, donde terrenos previamente cultivados han sido ocupados por matorrales, pastizales y, en algunos casos, bosques. En ambas provincias, el crecimiento urbano ha sido limitado, con una expansión muy moderada en comparación con otras regiones del país, lo que contrasta con las dinámicas nacionales, donde la urbanización ha sido un factor clave de cambio en los usos del suelo. En Soria y Teruel, las zonas urbanas han crecido principalmente en torno a las capitales provinciales, pero a un ritmo lento y sin una gran expansión de infraestructuras ni desarrollo inmobiliario.

El abandono de tierras agrícolas, especialmente en las áreas rurales más alejadas de las capitales provinciales, ha propiciado un incremento de la vegetación natural, como matorrales y formaciones arbustivas. Este fenómeno ha sido más pronunciado en zonas de montaña y áreas menos accesibles, donde la agricultura y la ganadería ya no son rentables. Por ello, el paisaje ha cambiado notablemente, con una pérdida progresiva de los usos tradicionales del suelo y la aparición de nuevos ecosistemas naturales. Otro aspecto relevante es la expansión de los bosques debido a procesos de reforestación y la falta de intervención humana en la gestión de los terrenos. En algunos casos, se ha promovido la forestación activa, mientras que en otros ha sido una consecuencia directa del abandono agrícola. Este cambio ha traído consigo desafíos y oportunidades, ya que, por un lado, contribuye a la recuperación de ecosistemas, pero también aumenta el riesgo de incendios forestales y la pérdida de biodiversidad agrícola.

El análisis de estas dinámicas sugiere que, a lo largo del periodo estudiado, Soria y Teruel han seguido una tendencia de cambios en los usos del suelo caracterizada por la disminución de la actividad agrícola y el crecimiento de la vegetación natural. Estas transformaciones están directamente vinculadas a la pérdida de población y la falta de inversión en las zonas rurales, lo que pone de relieve la necesidad de revisar las políticas de gestión del territorio y fomentar un desarrollo sostenible que tenga en cuenta estas nuevas realidades.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado en el marco del proyecto de investigación Ayudas para investigadores tempranos 2022V/ITEMP/08 financiado por UNED-Santander.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Cerdá, P. (2019). *Los últimos. Voces de la Laponia española*. Logroño: Pepitas de Calabaza.
- Frutos Mejías, L.M., Solans Castro, M. y Chueca Diago, M.C. (1994). Cambios en el sistema de asentamientos rurales: la provincia de Teruel. *Geographicalia*, 31, 83-94.
- Gallardo, M., Cocero, D. (2023) Using the European CORINE Land cover database: a 2011-2021 specific review. En M.L. de Lázaro Torres, R. de Miguel González (eds.). *Sustainable Development Goals in Europe*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-21614-5_15
- Levers, C., Schneider, M., Prishchepov, A.V., Estel, S., y Kuemmerle, T. (2018). Spatial variation in determinants of agricultural land abandonment in Europe. *Science of The Total Environment*, 644, 95-111, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.326>.
- López Ruiz, J.A. (2007). *La sociedad rural y el problema de la despoblación: perfiles sociales y actitudes ante la despoblación en Castilla y León*. Tesis Doctoral. Universidad de Salamanca.
- Otero, I., Marull, J., Tello, E., Diana, G.L., Pons, M., Coll, F., y Boada, M. (2015). Land abandonment, landscape, and biodiversity: Questioning the restorative character of the forest transition in the Mediterranean. *Ecology and Society*, 20 (2). <https://doi.org/10.5751/ES-07378-200207>
- Palacios, A., Pinilla Navarro, V.J. y Saéz Pérez, L.A. (2017). *La despoblación en Aragón, 2000-2016: tendencias, datos y reflexiones para el diseño de políticas*. Documentos de Trabajo (Universidad de Zaragoza. Facultad de Economía y Empresa), 6.
- Pontius, R.G. Jr., Shusas, E. y McEachern, M. (2004). Detecting important categorical land changes while accounting for persistence. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 101, 251-268. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2003.09.008>

- Rico González, M. (2020). El fenómeno de la despoblación rural en Castilla y León: implicaciones desde la perspectiva socioeconómica. *Práctica urbanística: Revista mensual de urbanismo*, 162.
- Rubio Guerrero, J.J. (2022). La despoblación en España: políticas públicas presupuestarias, financieras y fiscales para su reversión. Documento de Trabajo (IAES, Inst. Univ. de Análisis Económico y Social, 5, 1-23.
- Serra, P., Vera, A., Tulla, A.F. y Salvati, L. (2014). Beyond urban-rural dichotomy: Exploring socioeconomic and land-use processes of change in Spain. *Applied Geography*, 55, 71-81. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeog.2014.09.005>
- Vidal Domínguez, M.J. y Fernández Portela, J. (2022). El reto demográfico en Castilla y León (España): una región desequilibrada y envejecida poblacionalmente. *Perspectiva Geográfica: Revista del Programa de Estudios de Posgrado en Geografía*, 27 (2), 76-100. <https://doi.org/10.19053/01233769.13195>

Optimización de hiperparámetros de cuatro métodos de aprendizaje automático de clasificación de imágenes de satélite.

F. Alonso-Sarria^{1,2}, C. Valdivieso-Ros^{1,3}, F.J. Gomariz-Castillo^{1,2}, G. Molina-Pérez^{1,2}

¹ Instituto Universitario del Agua y el Medio Ambiente, Universidad de Murcia. Edificio D, Campus de Espinardo, 30100 Murcia

² Departamento de Geografía, Universidad de Murcia. Facultad de Letras, Campus de la Merced, 30001, Murcia.

³ Instituto Universitario de Investigación e Innovación Agroalimentaria y Agroambiental, Universidad Miguel Hernández. Carretera de Beniel, km 3,2, 03312, Orihuela, Alicante.

alonsarp@um.es, <https://orcid.org/0000-0003-0466-5184>

mcarmen.valdivieso@um.es, <https://orcid.org/0000-0002-4658-4633>

fjqomariz@um.es, <https://orcid.org/0000-0003-4306-6643>

gabriel.molina@um.es, <https://orcid.org/0009-0000-6064-2054>

RESUMEN: Este trabajo compara el rendimiento de los resultados del proceso de optimización de hiperparámetros para la clasificación de usos y coberturas del suelo realizado con cuatro métodos de aprendizaje automático y profundo, *Random Forest* (RF), *Support Vector Machines* (SVM), *Multi-Layer Perceptron* (MLP) y *Convolutional Neural Network* (CNN), utilizando datos multi-sensor. Se ha realizado un análisis de la información extraída del proceso de optimización de los algoritmos, así como de los resultados de las clasificaciones obtenidas con los modelos realizados con los hiperparámetros óptimos. Se han observado patrones destacables en el espacio definido por la media y la desviación estándar de los valores estimados de ajuste global mediante validación cruzada con reemplazo en grupos de diez y su relación con los valores de los hiperparámetros. El modelo menos sensible a los cambios en los hiperparámetros es RF, aunque no obtiene las métricas de ajuste global más altas (OA: 93.2%; *Kappa*: 92.3%). Por contra, uno de los modelos de redes neuronales obtiene valores de ajuste global muy altos (OA: 96.9%; *Kappa*: 95.8%), pero tiende a aumentar los errores de omisión y comisión de las clases menos representadas.

Palabras-clave: Optimización, Clasificación, aprendizaje automático, aprendizaje profundo.

1. INTRODUCCIÓN

La clasificación de usos y coberturas del suelo (LULC) con imágenes de sensores remotos es un procedimiento complejo en ciertas áreas como las semi-áridas mediterráneas del sureste español, debido a la gran diversidad de patrones espaciales, procedentes de un paisaje altamente fragmentado (Berberoglu et al., 2007), así como de patrones espectrales, procedentes de la mezcla de las propiedades espectrales de litología, suelos y características biofísicas de las especies vegetales existentes (Gomariz-Castillo et al. 2017). En las últimas décadas, métodos de Aprendizaje Automático (ML, por sus siglas en inglés) como *Random Forest* (RF) o *Support Vector Machines* (SVM) han sido los más utilizados, alcanzando métricas de ajuste muy satisfactorias, gracias a proyectos y misiones espaciales como el Programa Sentinel de la Agencia Espacial Europea. Este programa monitoriza la superficie terrestre y recoge datos de diferente naturaleza con diversos tipos de sensores (Reichstein et al., 2019; Valdivieso-Ros et al., 2023), como el SAR de Sentinel-1 y el sensor óptico MSI de Sentinel-2, que, aprovechando sus sinergias, se han utilizado con éxito para la clasificación con RF de pequeñas áreas agrícolas (Masiza et al., 2020), áreas urbanas (Dobrinic et al., 2020) o bosques (Luca et al. 2022), entre otros. Sin embargo, extraer información sobre el contexto espacial o temporal de las imágenes es difícil, pero importante para la clasificación de la cobertura del suelo analizada, motivo por el cual se ha avanzado en la aplicación de técnicas de Aprendizaje profundo (DL) como el Perceptrón multicapa (MLP) o las Redes neuronales profundas de convolución (CNN). No obstante, existen aún aspectos por desarrollar,

como el uso de datos de diferentes fuentes o sensores (Quin y Liu, 2022; Reichstein et al., 2022) o interpretabilidad de los modelos que lleven a una mejor comprensión de su funcionamiento (Reichstein et al., 2022). Por estos motivos, el principal objetivo de este trabajo es la comparación de los resultados de la clasificación realizada con cuatro algoritmos, RF, SVM, MLP y DCNN, así como un análisis adicional de la exhaustiva optimización de sus respectivos hiperparámetros.

2. METODOLOGÍA

Se han utilizado cuatro algoritmos de clasificación diferentes comprobando su idoneidad para la aplicación en una zona mediterránea semiárida del sureste de España, la cuenca del Mar Menor. El proceso de trabajo comienza con la adquisición y preproceso de las imágenes de los diferentes sensores, así como la extracción y cálculo de índices y las diferentes métricas utilizadas como variables predictoras junto a las bandas de cada sensor. Se han remuestreado todas las variables a 10 metros y corregistrado en un sistema de referencia espacial común.

2.1. Área de Estudio

El área de estudio es la cuenca del Mar Menor (Figura 1), de clima semiárido, temperaturas cálidas todo el año y alta variabilidad temporal y espacial de las precipitaciones. Tanto lluvias torrenciales como sequías son habituales. La laguna salada es de gran valor ecológico por ser la más grande de sus características en Europa y mantener una gran biodiversidad, afrontando serios problemas de eutrofización a consecuencia de la expansión continua desde hace décadas de los usos mayoritarios en el área: el agrícola, gracias a sus características edáficas y climáticas, y el urbano de un fuerte componente turístico en todo el borde litoral de la laguna.

2.2. Datos, áreas de entrenamiento y esquema de trabajo

Los datos utilizados proceden de ocho imágenes, SAR y MSI de los satélites Sentinel-1 y Sentinel-2, junto a cinco índices derivados de las bandas ópticas, *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), *Tasseled Cap Brightness* (TCB), *Soil Adjusted Vegetation Index* (SAVI), *Normalized Difference Built-up Index* (NDBI) y *Modified Normalized Difference Water Index* (MNDVI), y uno del SAR, *Dual Polarisation SAR Vegetation Index* (DPSVI), para la extracción de características biofísicas de la superficie sobre vegetación, suelo, edificaciones y agua. Adicionalmente, también se añaden tres métricas de textura de la Matriz de Co-ocurrencia del nivel de gris (GLCM, por sus siglas en inglés) de Haralick (Haralick et al., 1973): Segundo momento angular, Contraste y Entropía, de los datos del NDVI y el Primer componente de un Análisis de Componentes Principales. El conjunto de datos final se compone de 126 variables en total.

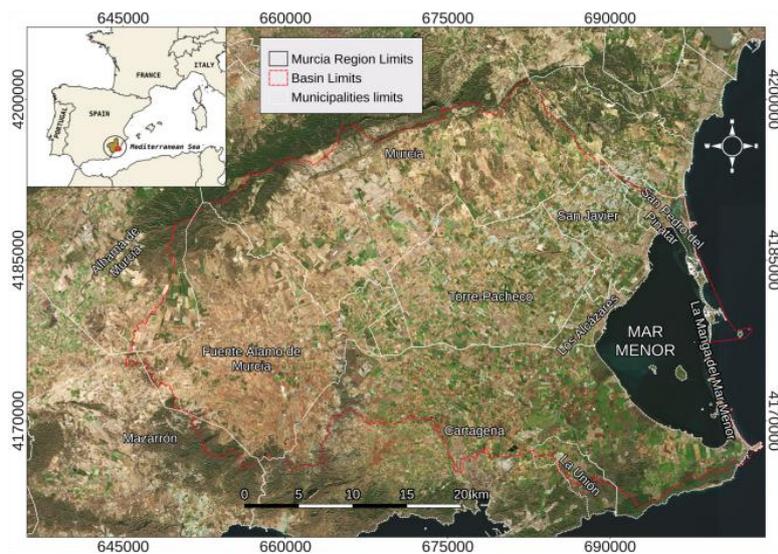


Figura 1. Área de estudio

Por otro lado, los datos de entrada para las CNN son una combinación de las tres bandas del visible con la del infrarrojo (B2, B3, B4 y B8) de la imagen de fecha 6-jun-2019.

El esquema de clasificación se divide en 9 clases diferentes, representando los usos y coberturas más importantes del área a escala regional: 1. Bosque, 2. Matorral, 3. Cultivos Arbóreos Densos (CAD), 4. Cultivos Herbáceos de regadío (CHR), 5. Impermeables, 6. Agua, 7. Suelo desnudo, 8. Invernaderos, 9. Mallas, y el conjunto de datos de entrenamiento dispone de 131 polígonos, digitalizados a partir de Ortofotografía aérea y mejorados mediante uso de ML para optimizar su representatividad sobre las clases del área (Alonso-Sarria et al., 2019). Este apartado de la metodología está diseñado por continuidad con el trabajo presentado en Valdivieso-Ros et al. (2023), que se puede consultar para mayor detalle sobre los procesos.

2.3. Algoritmos de clasificación

Los algoritmos de clasificación utilizados son *Random Forest* (RF), *Support Vector Machines* (SVM), *Perceptron Multilayer* (MLP) y *Deep Convolutional Neural Network* (DCNN). El número y naturaleza de los parámetros a optimizar varía dependiendo del algoritmo, por lo que la Tabla 1 muestra el resumen de todos ellos.

Tabla 1. Parámetros optimizados para cada algoritmo.

ALGORITMO	Parámetros	ALGORITMO	Parámetros
Random Forest (RF)	<i>ntree, mtry, maxsize</i>	Máquinas de Vectores Soporte (SVM)	RFB <i>gamma, cost</i>
Perceptrón Multicapa (MLP)	<i>nlayers, dropRate, learningRate, batchSize</i>		Polinomial <i>gamma, cost, degree, coef0</i>
Redes Profundas de Convolución (CNN)	<i>Learning rate, Drop rate, Batch size</i>		Sigmoide <i>gamma, cost, coef0</i>

3. RESULTADOS

3.1. Optimización de parámetros y validación

La Figura 3 muestra la media y las desviaciones estándar de los valores de exactitud obtenidos en validación cruzada con 10 remuestreos para diferentes conjuntos de hiperparámetros de RF. La mejor combinación es la que maximiza la media y minimiza la desviación estándar. La Figura 2b presenta un zoom a las mejores combinaciones en el espacio definido por la media y la desviación típica (Figura 2a). Se observa que el modelo no es muy sensible a *ntree* o *mtry*, con gran diversidad de valores en los mejores modelos. Por el contrario, si es sensible a *maxsize* (tamaño máximo de los árboles), ya que los valores más altos de precisión sólo se alcanzan con valores de 32 o *None* (sin tamaño máximo). El mejor ajuste se alcanzó con valores de *ntree* = 750 y *mtry* = 5 y *maxsize* = *None*. Los resultados se agrupan en varios patrones de forma compacta, aunque la mayoría de las combinaciones de parámetros se encuentran en el grupo de los ajustes más altos.

Las combinaciones de parámetros con SVM obtienen un mejor ajuste utilizando un *kernel* polinómico de grado 3, *cost* = 56, *gamma* = 0.001, y *Coef0* = 0.70, agrupándose la mayoría de los modelos en torno a valores de kappa de 0.3 y 0.8, pero sin un patrón claro de combinaciones de hiperparámetros para obtener mejores resultados, lo que dificulta su optimización. Con el algoritmo MLP se obtuvieron mayores valores de ajuste que con RF y SVM, combinando los valores de 2 *nLayers*, 0,01 de *Learning Rate*, 0,1 de *Drop Rate*, y *Batch Size* de 16. No obstante, tampoco se pudo observar una clara relación entre hiperparámetros para obtener los mejores resultados. Igualmente sucede con los modelos de CNN, aunque llegan a alcanzar un valor de ajuste de 0.951 combinando 0.005 para *Learning Rate*, *drop rate* de 0.25 y *batch size* de 32.

3.2. Clasificaciones

Una exhaustiva optimización de los hiperparámetros puede causar un sobreajuste en los modelos, por lo que se reservaron aleatoriamente una serie de polígonos de los datos de validación para prueba. La tabla 2 muestra algunos de los ajustes globales (OA) e índices *kappa*, así como las desviaciones estándar obtenidas con estos datos, a partir de la matriz de confusión (Rossiter, 2004). Son levemente mejores que las obtenidas en el proceso de validación cruzada, resultado poco habitual, pero posible si el conjunto tiene un nivel de ruido bajo. Las métricas alcanzadas por RF, SVM y MLP fueron similares, pero el modelo CNNa, obtuvo un claro descenso en las métricas respecto a los otros algoritmos y a los modelos anteriores, y errores de omisión y comisión en la clase 9 (mallas) muy elevados, probablemente debido a los problemas de generalización que tienen los modelos CNN calibrados con un conjunto de datos reducido. Por lo tanto, se utilizó un conjunto de datos mayor, aunque no equilibrado, obteniendo con este modelo, CNNb, las métricas de ajuste e índice *kappa* más altas.

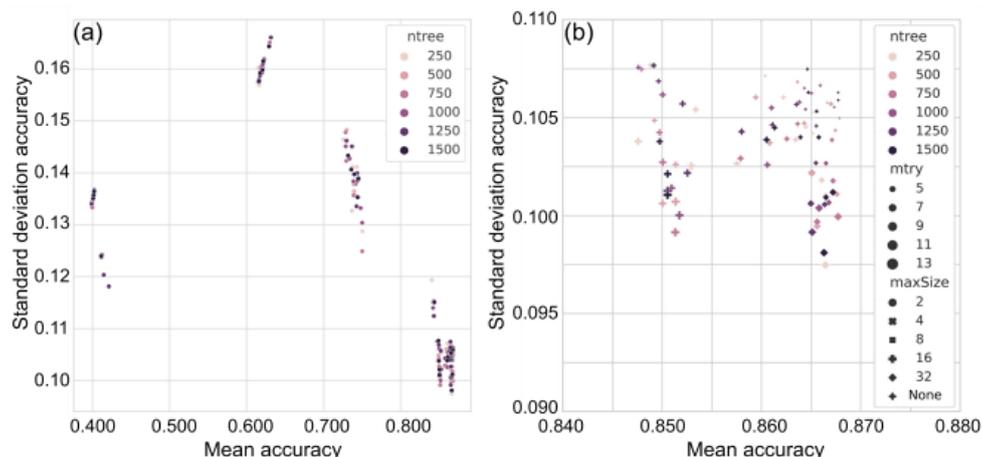


Figura 2. Media y desviaciones estándar de los valores de exactitud obtenidos en 10CV para diferentes conjuntos de hiperparámetros con RF (a) por cada combinación de parámetros y (b) zoom detallado a los modelos de mayor ajuste.

Tabla 2. Valores de ajuste (OA), índice kappa y desviaciones estándar (entre paréntesis) de la matriz de confusión de los mejores modelos CNNa es el modelo entrenado con el conjunto común y CNNb el entrenado con el conjunto de datos completo.

	RF	SVM	MLP	CNNa	CNNb
OA	0.932 (0,0044)	0.931 (0,0047)	0.939 (0,0044)	0.853 (0,0065)	0.969 (0,0007)
KAPPA	0.923 (0,0052)	0.919 (0,0055)	0.928 (0,0052)	0.826 (0,0077)	0.958 (0,0001)

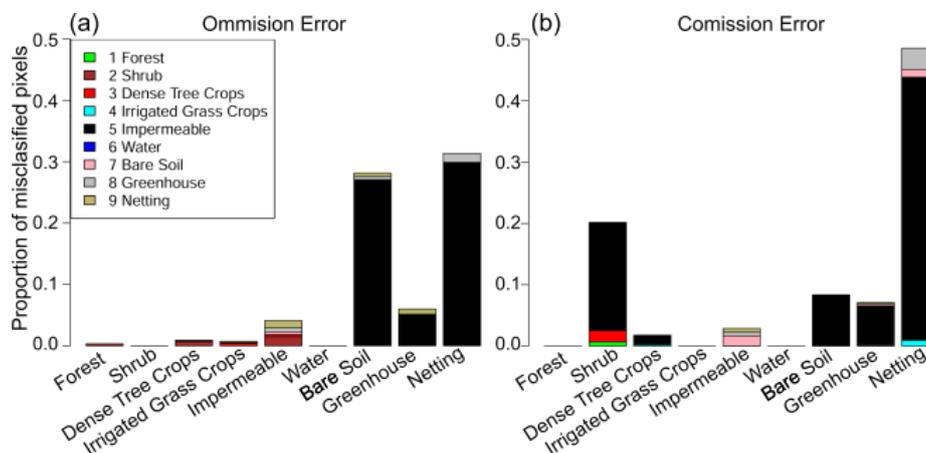


Figura 3. Errores de la matriz de confusión del modelo CNNb.

El posterior análisis por clases con las matrices de confusión (métricas de la tabla 3), muestra, sin embargo, que la mejor clasificación de las clases habitualmente más problemáticas, CAD y CHR, se obtiene con RF, mientras que CNNb seguía presentando serios problemas de generalización, con errores de omisión y comisión muy altos en las clases menos representadas del área (Figura 3). SVM y MLP obtuvieron métricas de ajuste y confusiones entre las clases 7, suelos desnudos, 5, impermeables u 8, invernaderos, y 9, mallas, muy similares entre sí y con RF, pero menos efectivos con las clases de cultivos que éste último.

Tabla 3. Métricas por clases con los modelos RF y CNNb. Prec: Precisión, Rec: Exactitud, BA: Ajuste equilibrado

		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
RF	Prec	0.965	1.00	0.998	1	0.859	1	0.987	0.956	0.800
	Rec	1.00	0.595	0.994	1	0.978	1	0.894	0.941	0.856
	BA	0.500	0.798	0.872	-	0.549	-	0.896	0.759	0.629
CNNb	Prec	0.679	1.000	0.988	0.925	0.758	1	0.963	0.996	0.286
	Rec	1.000	0.447	0.949	0.996	0.920	1	0.852	0.754	0.683
	BA	0.500	0.724	0.881	0.520	0.567		0.835	0.871	0.420

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos muestran que todos los algoritmos de clasificación probados tienen un ajuste similar, como ocurre en los estudios similares de Cánovas-García and Alonso-Sarria (2015) o Valdivieso-Ros et al. (2023). En contraste, las métricas obtenidas con la arquitectura CNNb calibrada con cuatro bandas de una sola imagen es ligeramente superior, similar a la presentada en Ali and Johnson (2022) en otra zona semiárida de Pakistán con la misma combinación de cuatro bandas. No obstante, los resultados muestran la influencia de la calidad y cantidad de los datos de entrenamiento y su sensibilidad ante su desequilibrio, como señalan Qin and Liu (2022) en su trabajo de revisión.

El uso de datos multisensor, que algunos autores como Zhang y Xu, (2018) consideran como fusión a nivel de características, y otros como Qin and Liu, (2022) o Reichstein et al., (2019), un tema poco explorado, no supone una gran diferencia entre RF, SVM y MLP en esta área de estudio en particular. Zhang and Xu, (2018) obtuvieron peores resultados con MLP en un estudio comparativo similar, probando diferentes niveles de fusión de datos ópticos y SAR y características extraídas de ambos.

Para concluir, cabe señalar la dificultad para establecer relaciones claras entre los valores de los parámetros y el ajuste. Se puede extraer que con RF los árboles deben crecer sin restricciones, en SVM el *kernel* polinómico parece funcionar mejor, y en MLP los mejores modelos se consiguen al reducir el número de capas y aumentar la tasa de aprendizaje. Esta falta de relaciones dificulta la optimización, pero destaca su importancia. A pesar de ello, la desviación estándar de los modelos de mayor ajuste no es muy grande.

AGRADECIMIENTOS

Proyecto: TED2021-131131B-I00 financiado por MICIU/AEI/ 10.13039/501100011033 y por la Unión Europea NextGenerationEU/PRTR.

CVR agradece al Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades del Gobierno de España por la financiación de su investigación predoctoral (FPU18/01447).

5. BIBLIOGRAFÍA

- Ali, K., Johnson, B.A., (2022a) Land-use and land-cover classification in semi-arid areas from medium-resolution remote-sensing imagery: A deep learning approach. *Sensors*, 22:8750. <https://doi.org/10.3390/s22228750>
- Alonso-Sarria, F., Valdivieso-Ros, C., Gomariz-Castillo, F., (2019) Isolation forests to evaluate class separability and the representativeness of training and validation areas in land cover classification. *Remote Sensing*, 11:3000. <https://doi.org/10.3390/rs11243000>
- Berberoglu, S., Curran, P.J., Lloyd, C.D., et al (2007) Texture classification of mediterranean land cover. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 9. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2006.11.004>
- Cánovas-García, F., Alonso-Sarria, F., (2015) Optimal combination of classification algorithms and feature ranking methods for object-based classification of submeter resolution z/i-imaging dmc imagery. *Remote Sensing*, 7:4651–4677. <https://doi.org/10.3390/rs70404651>
- Dobrinic, D., Medak, D., Gâsparović, M., (2020) Integration of multitemporal sentinel-1 and sentinel-2 imagery for land-cover classification using machine learning methods. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLIII-B1-2020:91–98. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B1-2020-91-2020>

- Gomariz-Castillo, F., Alonso-Sarria, F., Cánovas-García, F., (2017) Improving classification accuracy of multi-temporal landsat images by assessing the use of different algorithms, textural and ancillary information for a mediterranean semiarid area from 2000 to 2015. *Remote Sensing*, 9:1058. <https://doi.org/10.3390/rs9101058>
- Haralick, R.M., Shanmugam, K., Dinstein, I., (1973) Textural features for image classification. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, SMC-3:610–621. <https://doi.org/10.1109/TSMC.1973.4309314>
- Luca, G.D., Silva, J.M.N., Fazio, S.D., et al (2022) Integrated use of sentinel-1 and sentinel-2 data and open-source machine learning algorithms for land cover mapping in a mediterranean region. *European Journal of Remote Sensing*, 55:52–70. <https://doi.org/10.1080/22797254.2021.2018667>
- Masiza, W., Chirima, J.G., Hamandawana, H., et al., (2020) Enhanced mapping of a smallholder crop farming landscape through image fusion and model stacking. *International Journal of Remote Sensing*, 41:8739–8756. <https://doi.org/10.1080/01431161.2020.1783017>
- Qin, R., Liu, T., (2022) A review of landcover classification with very-high resolution remotely sensed optical images—analysis unit, model scalability and transferability. *Remote Sensing*, 14:646. <https://doi.org/10.3390/rs14030646>
- Reichstein, M, Camps-Valls, G, Stevens, B, et al., (2019) Deep learning and process understanding for data-driven earth system science. *Nature*, 566:195–204. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-0912-1>
- Rossiter, D., (2004) Statistical methods for accuracy assesment of classified thematic maps. Tech. rep., Department of Earth Systems Analysis International Institute for Geo-information Science & Earth Observation (ITC), Enschede (NL).
- Valdivieso-Ros, C., Alonso-Sarria, F., & Gomariz-Castillo, F., (2023). Effect of the synergetic use of sentinel-1, sentinel-2, LiDAR and derived data in land cover classification of a semiarid mediterranean area using machine learning algorithms. *Remote Sensing*, 15(2), 312. <https://doi.org/10.3390/rs15020312>
- Zhang, H., Xu, R. (2018) Exploring the optimal integration levels between sar and optical data for better urban land cover mapping in the pearl river delta. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 64:87–95. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.08.013>

2. MODELADO, ANÁLISIS Y REPRESENTACIÓN ESPACIAL

¿Es posible mejorar los datasets climáticos en malla? Evaluación de los *datasets* existentes en España y su mejora mediante ensembles multimodelo y Random Forest

F. Gomariz-Castillo,^{1,2} F. Alonso-Sarría^{1,2}, M.C. Valdivieso-Ros^{1,2}, F. Pellicer-Martínez³, G. Molina-Pérez²

¹ Departamento de Geografía, Universidad de Murcia. Campus de la Merced, 30.001 Murcia

² Instituto Universitario del Agua y del Medio Ambiente, Universidad de Murcia. Campus de Espinardo, Edificio D, s/n, 30.001 Murcia.

³ Escuela Politécnica Superior, Universidad Católica de Murcia (UCAM). Campus de los Jerónimos, 30.107 Guadalupe (Murcia).

fjgomariz@um.es, <https://orcid.org/0000-0003-4306-6643>

alonsarp@um.es, <https://orcid.org/0000-0003-0466-5184>

mcarmen.valdivieso@um.es, <https://orcid.org/0000-0002-4658-4633>

fpellicer@ucam.edu, <https://orcid.org/0000-0002-0962-6136>

gabriel.molina@um.es, <https://orcid.org/0009-0000-6064-2054>

RESUMEN: Generar datos climáticos mediante modelos espacialmente distribuidos y evaluar su exactitud, es básico para evaluar y gestionar los recursos hídricos, así como para estudiar el Cambio Climático, especialmente en medios semiáridos. Por este motivo, en los últimos años se han generado mallas espaciales y temporales como base para múltiples estudios. En este sentido, este trabajo tiene dos objetivos: a) evaluar la bondad de ajuste de las mallas disponibles para España contrastando sus valores con estaciones no empleadas en su estimación ni en su predicción, y b) comprobar la mejora de la bondad de ajuste en predicción utilizando ensembles multi-modelo basados en aprendizaje automático. Utilizando Random Forest (RF) se han generado rejillas de datos mensuales de precipitación total, temperatura máxima, mínima y media, con alta resolución espacial (1 km). Se parte de 7 *data-sets*, Iberia01, STEAD, AEMET, SIMPA, E-OBSv25 y STEAD que actúan como predictores. La bondad de ajuste se estima mediante la raíz del error cuadrático medio, el porcentaje de sesgo y el índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe obtenidos mediante una validación cruzada robusta ante la autocorrelación espacial basada en *block cross-validation buffering* (LOOBUF-CV). La significancia de las diferencias se ha evaluado mediante modelos ANOVA con autocorrelación espacial en los errores. Los resultados preliminares indican que los ensembles multimodelo utilizando RF superan en bondad de ajuste a las mallas individuales. Ello puede ser debido, entre otras razones, a que los modelos basados en ensembles multimodelo permiten incorporar representaciones de procesos incluidos de forma individual en cada malla por separado, y reducir la incertidumbre implícita en ellos mediante su combinación.

Palabras-clave: Regresión espacial Random Forest, Ensembles multimodelo, *datasets* climáticos, ANOVA con autocorrelación espacial

1. INTRODUCCIÓN

Las variables climáticas son básicas en numerosas disciplinas, como los estudios agronómicos, ambientales, hidrológicos y de recursos hídricos, riesgos climáticos o los impactos derivados del cambio climático (Fick y Hijmans, 2017). La mayor disponibilidad de datos y un aumento en la capacidad de cálculo han permitido generar mallas de datos espacio-temporales que proporcionan al usuario final un acceso sencillo a estimaciones ya depuradas (Wang et al., 2012), permitiendo incorporar patrones espaciales de las variables (Gomariz Castillo y Alonso Sarría, 2018). En la España existen 9 proyectos que tratan este problema y generan mallas de variables climáticas (en este trabajo se utilizan mallas de 8 de ellos, ver Tabla 2).

A pesar de su gran utilidad, no dejan de estar sujetas a errores. Devineni et al. (2008) diferencian errores de dos tipos: (a) incertidumbres asociadas a las condiciones iniciales y de contorno y (b) errores en el propio modelo. Los ensembles multi-modelos (MME) permiten reducir los errores de los modelos individuales al integrar diferentes representaciones de los procesos físicos y de los modelos de los que derivan, reduciendo su incertidumbre implícita al combinar sus resultados (Ruiz-Álvarez et al., 2021). En climatología, los MME suelen utilizarse para obtener series a partir de los modelos asociados a escenarios de cambio climático. Para ello, tradicionalmente se han utilizado métodos simples basados en medias o medias ponderadas. Más recientemente se han utilizado algoritmos de aprendizaje automático, como el estudio de Ahmed et al. (2020) para precipitaciones y temperaturas mensuales. En España, Ruiz-Álvarez et al. (2021) utilizan Random Forest (RF) para mejorar series de Evapotranspiración Potencial de Referencia (ET₀) diaria a partir de modelos asociados a escenarios de cambio climático. Sin embargo, apenas existen trabajos que propongan el uso de diversos productos y su ensemble para mejorar los resultados, destacando el de Yazdandoost et al., (2020) para precipitación diaria, aunque solamente utilizan 12 estaciones.

Este estudio tiene un doble objetivo: a) evaluar la bondad de ajuste de las mallas disponibles para España con observaciones de estaciones climáticas no empleadas en la generación éstas, y b) utilizar MME basados en el algoritmo RF para mejorar la bondad de ajuste de predicción de datos climáticos mensuales de la precipitación y temperatura mínima, máxima y media. Para ello, se parte de las siguientes hipótesis: a) las técnicas de ensembles pueden mejorar el ajuste de las mallas individuales y b) utilizar datos climáticos adicionales a los utilizados en las mallas puede mejorar los resultados obtenidos.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

Para depurar y procesar los datos, e implementar los MME, se ha utilizado el programa de análisis de datos R-CRAN (R Core Team, 2022). La información espacial se ha procesado con Quantum GIS (QGIS Development Team, 2023).

2.1. Área de estudio y fuentes de información

El estudio se ha realizado para datos observados de 971 estaciones de 7 redes de estaciones climáticas y agroclimáticas con información diaria (Figura 1, Tabla 1). Para detectar posibles errores, valores anómalos y derivas en las series se ha utilizado el paquete de R-CRAN *climatol* (Guijarro, 2023), que compara los datos observados en cada estación con una serie de referencia, estimada como la media ponderada por distancia de las estaciones más próximas.

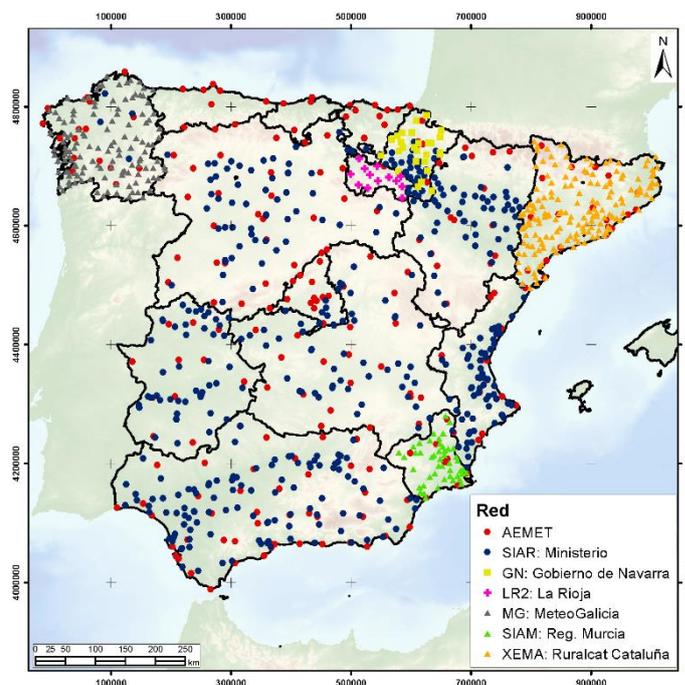


Figura 7. Distribución espacial de las estaciones meteorológicas y agroclimáticas utilizadas.

2.2. Ensembles multi-modelo

Se han utilizado dos métodos de ensemble multi-modelo: Media simple (SA) y Random Forest (RF) (Breiman, 2001). Entre sus ventajas frente a los métodos tradicionales destacan la estimación de la importancia de cada predictor en el modelo, no requerir supuestos estadísticos a priori, ser menos sensibles a los *outliers*, y no sobre ajustar los modelos. Como covariables en el ensemble multi-modelo se han utilizado 8 rejillas de datos climáticos (Tabla 2). Las mallas con paso de tiempo diario se han agregado por meses y se han asignado como serie temporal a las estaciones seleccionadas.

Tabla 1. Resumen de las redes de estaciones meteorológicas y agroclimáticas utilizadas.

Red	Nº de estaciones	Enlace
Agencia Estatal de Meteorología (AEMET)	219	https://www.aemet.es/es/datos_abiertos/AEMET_Open-Data
RuralCat (red XEMA)	155	https://ruralcat.gencat.cat/agrometeo.estacions
Gobierno de Navarra (GN)	27	http://meteo.navarra.es/estaciones/descargardatos.cfm
S.I. Agrario de Murcia (SIAM)	47	http://siam.imida.es/apex/f?p=101:46:4024577541991326
S.I. Agroclimática para el Regadío (SIAR)	397	https://servicio.mapa.gob.es/websiar
Gobierno de la Rioja (LR2)	13	0.0585ºx0.045º
MeteoGalicia (MG)	113	https://www.meteogalicia.gal/observacion/estacions/estacions.action?request_locale=es

Tabla 2. Mallas de variables climáticas utilizadas en este trabajo.

Dataset	Extensión	Resolución	Resolución temporal	Variabes
AEMET (Amblar-Francés et al., 2020)	España	0.05º	1951-2021 (diaria)	4
E-OBSv27 (Cornes et al., 2018)	Europa	0.1º	1950-2022 (diaria)	8
IBERIA01 (Herrera et al., 2019)	Península	0.1º	1971-2015 (diaria)	4
MOPREDAS (Beguería et al., 2023)	España	0.1º	1915-2019 (mensual)	1 (precip)
SIMPA (MITECO, 2024)	España	500 m	1950-2020 (mensual)	10
STEAD (Serrano-Notivoli et al., 2019)	España	0.0585ºx0.045º	1901-2014 (diaria)	2 (temp)
TERRACLIMATE (Abatzoglou et al., 2018)	Mundial	0.04167º	1958-2022 (mensual)	15
WORLDCLIM (Harris et al., 2020)	Mundial	0.04167º	1960-2021 (mensual)	4

2.3. Estimación de la bondad de ajuste

Para validar los resultados en bondad de ajuste se ha utilizado una validación cruzada uno a uno con separación espacial mediante buffer (LOOBUF-CV) (Valavi et al., 2019), estrategia similar a LOO-CV pero dejando fuera las estaciones a una distancia umbral (en este trabajo 20 km). Los datos utilizados abarcan el intervalo temporal de enero de 2000 a diciembre de 2014, con información en todas las mallas de forma simultánea.

La bondad de ajuste entre los valores observados, los miembros simples y los 2 MME se ha estimado a partir de tres estadísticos: a) La raíz del error cuadrático medio (RMSE); b) el porcentaje de sesgo (PBIAS) (valores positivos indican subestimación y negativos sobreestimación) y c) el índice Nash y Sutcliffe (1970) (NSE) que varía entre 1 (el mejor ajuste posible) y 0 o inferior (sin ajuste). La significancia de las diferencias entre los modelos se evalúa mediante ANOVA con estructura de autocorrelación de los residuos (GLS-ANOVA), tratando de solventar el problema de la dependencia espacial. La significancia entre los diferentes modelos se evalúa con el contraste a posteriori de Tukey-Kramer, identificando subconjuntos homogéneos en significancia; en la Figura 2 se incluyen éstos como letras en la parte superior de las cajas, indicando si sus

medias son significativamente diferentes (cajas en diferentes subgrupos de letras) o no (subgrupos con una misma letra). La normalidad y homocedasticidad se evaluaron con los test Kolmogov-Smirnov y Levene.

3. RESULTADOS

La Figura 2 y Tabla 3 resumen los resultados de NSE con LOOBUF-CV para las cuatro variables estudiadas. Se presenta la distribución de los valores por estación, con cajas ordenadas de peor a mejor NSE medio, el p-valor obtenido en los ANOVAs y la presentación por subconjuntos homogéneos de los contrastes a posteriori, para identificar las diferencias significativas entre los miembros simples y los dos MME.

Los ANOVAs de todas las variables son significativos, indicando diferencias entre las series. Las cuatro variables muestran valores de NSE elevados, aunque con bastantes estaciones fuera de las cajas (suelen ser estaciones no utilizadas para estimar las mallas). En las cuatro variables estudiadas RF obtiene el mejor NSE medio y una menor dispersión en los resultados (amplitud de las cajas), indicando la mejora mediante este tipo de ensemble en la bondad de ajuste. Los subconjuntos homogéneos indican que RF, en promedio, se ajusta significativamente mejor a los valores observados que los miembros simples en el caso de la temperatura media mensual (Figura 2(a)) y la precipitación total mensual (Figura 2(d)). En el caso de las variables relacionadas con la temperatura, STEAD es el miembro simple que mejor se ajusta a los valores observados, no difiriendo significativamente respecto a RF en la temperatura media máxima (Figura 2(b)) y mínima (Figura 2(c)). En el caso de la precipitación total mensual, el miembro simple con un mejor ajuste en promedio es la malla SIMPA, seguido de las mallas de la AEMET.

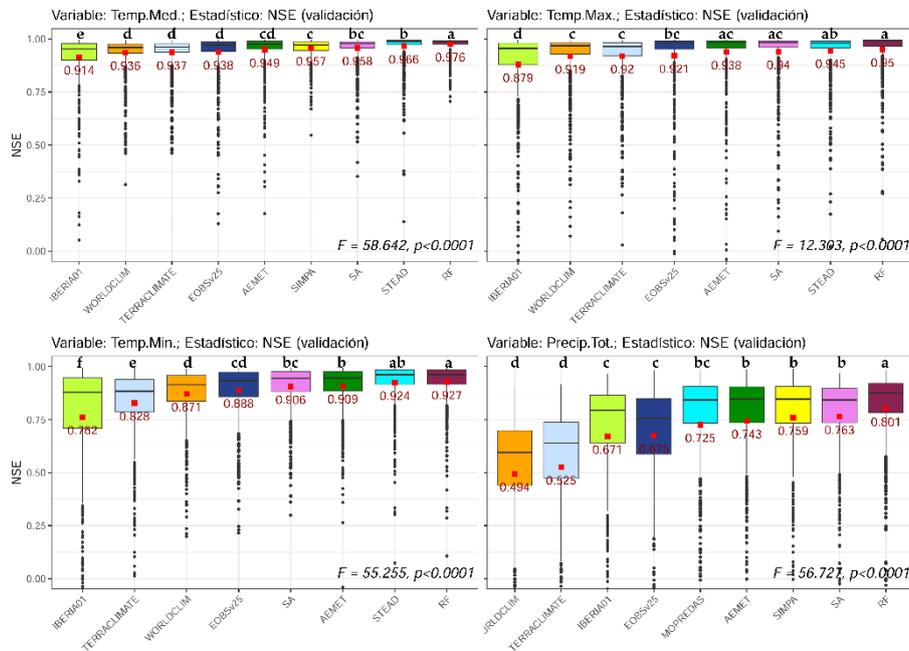


Figura 8. Resultados de la estimación de bondad de ajuste de NSE en validación y contrastes.

En RMSE y PBIAS ocurre algo similar. RF consigue los valores de sesgo más bajos (2 %) y corrige para las tres variables los sesgos elevados detectados en varias estaciones. El predictor menos sesgado es la malla STEAD. En precipitación se observa una mayor dispersión por la propia naturaleza de ésta. Aun así, los valores de NSE siguen siendo altos, siendo el RF el más elevado, aunque sin diferencias significativas con SIMPA y AEMET. Para esta variable, el número de estaciones con valores de NSE por debajo de la distribución de las cajas es mayor que en los casos anteriores. Analizando la importancia de los predictores (data-sets de malla) para las tres variables de temperatura, IBERIA01 es la malla con mayor peso. En el caso de la precipitación total mensual, variable más compleja de estimar, la malla SIMPA es la más relevante, seguida de la malla AEMET; en ambos casos es probable que se deba a la mayor densidad de estaciones que incorporan ambas (en el primer caso los pluviómetros del Sistema Automático de Información Hidrológica -SAIH- y en el segundo 3236 estaciones del Banco Nacional de datos climatológicos).

Tabla 3. Bondad de ajuste media en LOOBUF-CV. Ic es el intervalo de confianza al 95% de la media.

	NSE			RMSE			PBIAS		
	modelo	NSE me- dio	ic	modelo	RMSE me- dio	ic	modelo	PBIAS me- dio	ci
Temperatura media mensual	RF	0.975	0.035	RF	0.788	0.025	RF	0.656	0.446
	STEAD	0.964	0.067	STEAD	0.887	0.035	STEAD	1.059	0.861
	SIMPA	0.963	0.046	SIMPA	0.965	0.034	IBERIA01	3.409	1.012
	SA	0.960	0.066	SA	0.969	0.035	SA	4.334	0.785
	AEMET	0.952	0.087	AEMET	1.048	0.039	AEMET	4.682	0.926
	TERRACLI- MATE	0.941	0.077	EOBSv25	1.142	0.047	SIMPA	4.742	0.475
	WORLDCLIM	0.939	0.078	TERRACLI- MATE	1.240	0.033	EOBSv25	5.080	1.026
	EOBSv25	0.939	0.112	WORLDCLIM	1.267	0.033	WORLDCLIM	5.517	0.723
	IBERIA01	0.911	0.133	IBERIA01	1.440	0.053	TERRACLI- MATE	5.850	0.777
	Temperatura máxima mensual	NSE			RMSE			PBIAS	
modelo		NSE me- dio	ic	modelo	RMSE me- dio	ic	modelo	PBIAS me- dio	ci
RF		0.951	0.007	RF	1.076	0.050	STEAD	-1.187	0.591
STEAD		0.945	0.007	SA	1.174	0.054	TERRACLI- MATE	-0.078	0.583
SA		0.940	0.008	AEMET	1.177	0.055	RF	0.698	0.526
AEMET		0.940	0.009	STEAD	1.177	0.051	SA	1.156	0.630
EOBSv25		0.921	0.011	EOBSv25	1.290	0.068	AEMET	1.848	0.634
TERRACLI- MATE		0.919	0.008	WORLDCLIM	1.521	0.049	EOBSv25	1.989	0.736
WORLDCLIM		0.918	0.008	TERRACLI- MATE	1.536	0.050	WORLDCLIM	2.126	0.575
IBERIA01		0.870	0.016	IBERIA01	1.782	0.074	IBERIA01	2.243	0.849
Temperatura mínima mensual	NSE			RMSE			PBIAS		
	modelo	NSE me- dio	ic	modelo	RMSE me- dio	ic	modelo	PBIAS me- dio	ci
	RF	0.927	0.007	RF	1.167	0.039	STEAD	0.287	1.552
	STEAD	0.922	0.007	STEAD	1.181	0.040	RF	1.643	1.396
	AEMET	0.914	0.007	AEMET	1.280	0.043	IBERIA01	1.835	2.433
	SA	0.912	0.007	SA	1.299	0.043	AEMET	4.687	1.911
	EOBSv25	0.894	0.009	EOBSv25	1.389	0.052	SA	6.692	1.483
	WORLDCLIM	0.877	0.009	WORLDCLIM	1.582	0.046	EOBSv25	7.825	1.927
	TERRACLI- MATE	0.842	0.011	TERRACLI- MATE	1.805	0.052	WORLDCLIM	10.398	1.857
	IBERIA01	0.775	0.020	IBERIA01	2.028	0.079	TERRACLI- MATE	15.119	2.062
Pre	NSE			RMSE			PBIAS		

modelo	NSE me- dio	ic	modelo	RMSE me- dio	ic	modelo	PBIAS me- dio	ci
RF	0.799	0.021	RF	18.603	0.927	EOBSv25	-2.094	1.401
SIMPA	0.765	0.028	SIMPA	19.315	1.032	RF	3.026	0.999
SA	0.744	0.024	SA	21.156	0.946	SIMPA	5.535	1.045
AEMET	0.714	0.030	AEMET	21.540	0.971	SA	9.206	1.210
MOPREDAS	0.690	0.042	MOPREDAS	21.863	1.070	WORLDCLIM	9.858	1.714
EOBSv25	0.654	0.027	IBERIA01	25.147	1.109	TERRACLI- MATE	10.092	1.714
IBERIA01	0.616	0.040	EOBSv25	25.172	1.189	MOPREDAS	11.879	1.446
TERRACLI- MATE	0.496	0.032	TERRACLI- MATE	31.219	1.242	AEMET	13.163	1.291
WORLDCLIM	0.466	0.031	WORLDCLIM	32.682	1.263	IBERIA01	16.004	1.543

4. CONCLUSIONES

Random Forest permite obtener un ajuste a datos reales significativamente mejor que los predictores originales o su promedio. Ello puede deberse a que este tipo de técnicas permiten reducir la incertidumbre respecto a la de las mallas que utilizan como predictores, e incorporar la información subyacente asociada a los diferentes métodos de estimación utilizados para generar éstas a partir de diferentes observatorios y en algunos casos con predictores ambientales. Por otro lado, el proceso de calibración empleado permite incorporar series climáticas adicionales a las incluidas en las mallas.

AGRADECIMIENTOS

Proyecto: TED2021-131131B-I00 financiado por MICIU/AEI/ 10.13039/501100011033 y por la Unión Europea NextGenerationEU/PRTR.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Abatzoglou, J.T., Dobrowski, S.Z., Parks, S.A., Hegewisch, K.C. (2018). TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958–2015. *Scientific Data*, 5(1), 170191. <https://doi.org/10.1038/sdata.2017.191>
- Ahmed, K., Sachindra, D.A., Shahid, S., Iqbal, Z., Nawaz, N., Khan, N. (2020). Multi-model ensemble predictions of precipitation and temperature using machine learning algorithms. *Atmospheric Research*, 236, 104806. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.104806>
- Amblar-Francés, M.P., Ramos-Calzado, P., Sanchis-Lladó, J., Hernanz-Lázaro, A., Peral-García, M., ... Rodríguez-Camino, E. (2020). High resolution climate change projections for the Pyrenees region. *Advances in Science and Research*, 17, 191–208. <https://doi.org/10.5194/asr-17-191-2020>
- Beguiría, S., Peña-Angulo, D., Trullenque-Blanco, V., González-Hidalgo, C. (2023). MOPREDAScentury: a long-term monthly precipitation grid for the Spanish mainland. *Earth System Science Data*, 15(6), 2547–2575. <https://doi.org/10.5194/essd-15-2547-2023>
- Breiman, L. (2001). Random Forests. *Machine Learning*, 45(1), 5–32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
- Cornes, R.C., van der Schrier, G., van den Besselaar, E.J.M., Jones, P.D. (2018). An Ensemble Version of the E-OBS Temperature and Precipitation Data Sets. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123(17), 9391–9409. <https://doi.org/10.1029/2017JD028200>
- Devineni, N., Sankarasubramanian, A., Ghosh, S. (2008). Multimodel ensembles of streamflow forecasts: Role of predictor state in developing optimal combinations. *Water Resources Research*, 44(9). <https://doi.org/10.1029/2006WR005855>
- Fick, S.E., Hijmans, R.J. (2017). WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 37(12), 4302–4315. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>

- Gomariz Castillo, F., Alonso Sarría, F. (2018). Effect of watershed subdivision and estimation of climatic variables on hydrological simulation with the swat model in semi-arid mediterranean basins. *Papeles de Geografía*, 64(64), 114–133. <https://doi.org/10.6018/geografia/2018/331531>
- Guijarro, J.A. (2023). *climatol: Climate Tools (Series Homogenization and Derived Products)*. R package version 4.0.0. <https://cran.r-project.org/package=climatol>
- Harris, I., Osborn, T.J., Jones, P., Lister, D. (2020). Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. *Scientific Data*, 7(1), 109. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0453-3>
- Herrera, S., Cardoso, R.M., Soares, P.M., Espírito-Santo, F., Viterbo, P., Gutiérrez, J.M. (2019). Iberia01: a new gridded dataset of daily precipitation and temperatures over Iberia. *Earth System Science Data*, 11(4), 1947–1956. <https://doi.org/10.5194/essd-11-1947-2019>
- MITECO. (2024). Modelo SIMPA. Periodo de simulación: 1940/41 a 2017/18. Retrieved March 1, 2024, from <https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/evaluacion-de-los-recursos-hidricos/evaluacion-recursos-hidricos-regimen-natural/>
- QGIS Development Team. (2023). *QGIS Geographic Information System*. <https://www.qgis.org>
- R Core Team. (2022). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. <https://www.r-project.org/>
- Ruiz-Álvarez, M., Gomariz-Castillo, F., Alonso-Sarría, F. (2021). Evapotranspiration response to climate change in semi-arid areas: Using random forest as multi-model ensemble method. *Water*, 13(2). <https://doi.org/10.3390/w13020222>
- Serrano-Notivol, R., Beguería, S., de Luis, M. (2019). STEAD: a high-resolution daily gridded temperature dataset for Spain. *Earth System Science Data*, 11(3), 1171–1188. <https://doi.org/10.5194/essd-11-1171-2019>
- Valavi, R., Elith, J., Lahoz-Monfort, J.J., Guillera-Arroita, G. (2019). blockCV: An r package for generating spatially or environmentally separated folds for k-fold cross-validation of species distribution models. *Methods in Ecology and Evolution*, 10(2), 225–232. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13107>
- Wang, T., Hamann, A., Spittlehouse, D.L., Murdock, T.Q. (2012). ClimateWNA—High-Resolution Spatial Climate Data for Western North America. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 51(1), 16–29. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-11-043.1>
- Yazdandoost, F., Moradian, S., Izadi, A., Bavani, A.M. (2020). A framework for developing a spatial high-resolution daily precipitation dataset over a data-sparse region. *Heliyon*, 6(9), e05091. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05091>

Análisis de la evolución de los patrones de drenaje del Río Cinca: factores y tendencias desde la época preindustrial a la actualidad

V. Trullenque Blanco¹, A. L. Montealegre Gracia^{2,3}, A. Ollero Ojeda^{3,4}

¹ Departamento de Suelo y Agua, Estación Experimental de Aula Dei - CSIC. Avda. Montañana 1005 Zaragoza (Zaragoza).

² Centro Universitario de la Defensa, Academia General Militar. Carretera Huesca s/n, 50090 Zaragoza (Zaragoza).

³ Instituto Universitario de Investigación en Ciencias Ambientales de Aragón (IUCA). C. Pedro Cerbuna 12, 50009 Zaragoza (Zaragoza).

⁴ Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio, Universidad de Zaragoza. C. Pedro Cerbuna 12, 50009 Zaragoza (Zaragoza).

vtrullenque@eead.csic.es, monteale@unizar.es, aollero@unizar.es

RESUMEN: El conocimiento de la geomorfología, entre otros aspectos, es el punto de partida para la conservación de la estructura y el funcionamiento de los ecosistemas fluviales. Los objetivos de este estudio son: a) cartografiar los patrones de drenaje del río Cinca (Aragón) en tres momentos distintos (época pre-industrial, inicio del Antropoceno y actualidad) a partir de mapas históricos y fotografías aéreas, b) evaluar los atributos físicos primigenios del río y su cuenca mediante el cálculo de variables físicas, c) identificar vectores de cambio naturales y antrópicos. Para ello se ha tramificado el río en sectores homogéneos y se han analizado sus características en cada uno de ellos. Los resultados obtenidos indican que en los siglos XVIII-XIX algo más del 40% del curso del río Cinca presentaba un patrón multi-canal, el tipo fluvial divagante se encontraba en el 22% del río, los tramos sinuosos representaban casi un tercio del total (27 %), mientras que los canales rectos eran más escasos (8%), no encontrándose secciones meandriformes. Sin embargo, en la actualidad los tramos multi-canal apenas representan el 21% de su longitud histórica y el 23% del río está intensamente canalizado o se ha embalsado, habiéndose producido estos cambios a partir de la segunda mitad del siglo XX. Las presiones humanas han afectado tanto a la geometría local del cauce como a los factores de control aguas arriba, por lo que parte de los tramos con patrón multi-canal se han simplificado, siendo necesaria una gestión integral y multiescalar de los sistemas fluviales para promover su conservación y restauración.

Palabras-clave: geomorfología fluvial, Pequeña Edad de Hielo, presión antrópica, cuenca de montaña.

1. INTRODUCCIÓN

Las recientes regulaciones legislativas de la Unión Europea enfatizan la restauración y gestión sostenible de los ecosistemas fluviales, sugiriendo que las características geomorfológicas de los ríos deben ser consideradas en la planificación territorial de estos enclaves. Su estado ecológico y geomorfológico actual no puede explicarse sin contextualizarlo en una escala de tiempo más amplia. Los mapas antiguos junto a la fotointerpretación de imágenes aéreas, proporcionan información única para evaluar los cambios en los cauces fluviales a lo largo de periodos temporales extensos que, en ocasiones, permiten remontar hasta cerca de doscientos años atrás (García et al., 2020).

Los cambios en las condiciones climáticas, desde la transición de la Pequeña Edad de Hielo al cambio climático actual, junto con la actividad antrópica desarrollada en los últimos ciento cincuenta años han afectado intensamente los procesos y formas fluviales, especialmente en Europa. Numerosos estudios han abordado el estado eco-geomorfológico de grandes ríos europeos y españoles en el pasado, pero raramente abarcan su curso al completo (Piégay et al., 2009; Rădoane et al., 2017; Hohensinner et al., 2020). En particular, existe una carencia de información acerca de los ríos de la montaña mediterránea ibérica, sobre todo de los ríos pirenaicos de la vertiente española, que comprenda desde la época preindustrial hasta nuestros días.

En este contexto, el presente estudio realizado en el río Cinca (Aragón), pretende responder a las siguientes cuestiones: a) ¿Cómo se distribuían espacialmente sus patrones de drenaje a lo largo del *continuum* fluvial en época pre-industrial, en el inicio del Antropoceno y en la actualidad?; b) ¿qué características físicas “primigenias” presentaba el río y su cuenca?; c) ¿cuáles son los vectores de cambio que han dado paso a la

evolución morfológica del río?

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

El río Cinca se encuentra en el NE de la península Ibérica, tiene una longitud de 177 km, su cuenca ocupa 9740 km² y es uno de los principales colectores del río Ebro (Figura 1). Su cuenca presenta un gradiente altitudinal norte-sur, abarcando desde el Pirineo Axial (al NE, rocas ígneas y metamórficas) a la depresión del Ebro (al S, depósitos sedimentarios), pasando por las Sierras Interiores, Depresión Intermedia y Sierras Exteriores (rocas y otros materiales sedimentarios). En el norte de la cuenca se producen precipitaciones superiores a 1000 mm/año con una temperatura media anual inferior a 8 °C, mientras que en el sur las precipitaciones no alcanzan los 400 mm/año y la temperatura media anual supera los 15 °C (CHE, 2008). Los usos del suelo de la cuenca han protagonizado importantes cambios en época reciente: la superficie cultivada y pastada de las zonas altas se ha visto reducida, la proporción de terreno forestal y de matorral ha aumentado, y en las zonas llanas se han puesto en regadío grandes superficies. Los principales embalses de la cuenca son los de Mediano (436 hm³, año 1974), El Grado (400 hm³, año 1969), Barasona (72 hm³, año 1932) y San Salvador (135 hm³, año 2015). Otros impactos antrópicos destacables presentes en el río son la presencia de azudes, las extracciones de gravas y la construcción de defensas.

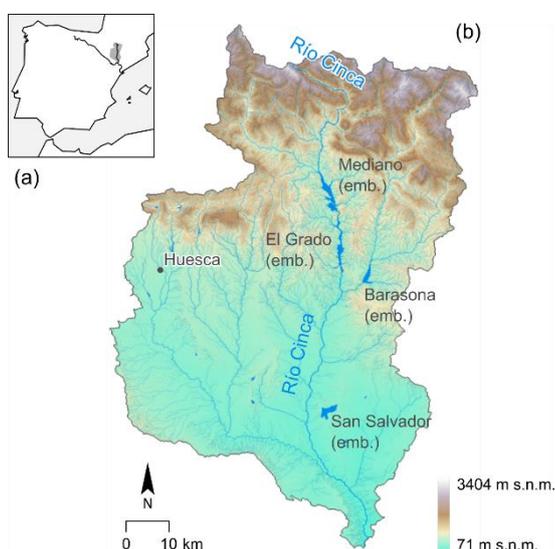


Figura 1. (a) Localización de la cuenca del río Cinca en el contexto espacial de la Península Ibérica; (b) relieve, red fluvial y principales embalses de la cuenca del Cinca.

2.2. Cartografía de los patrones de drenaje

Los patrones de drenaje del río Cinca en los tres períodos de estudio (preindustrial, al inicio del Antropoceno y en la actualidad) se han identificado mediante fotointerpretación de fotografías aéreas y con material cartográfico histórico (Tabla 1). Todo ello se ha realizado con el software QGIS. De acuerdo con Fryirs y Brierley (2013), se han distinguido las siguientes clases de patrón fluvial: proglaciar, efímero, rectilíneo, sinuoso, divagante, meandriforme y multi-canal.

Tabla 1. Fuentes de datos empleadas en la cartografía de patrones de drenaje.

<i>Periodo</i>	<i>Fuente de datos</i>
Preindustrial (siglos XVIII-XIX)	Material procedente del Archivo-Biblioteca de los Barones de Valdeolivos, Archivo Cartográfico de Estudios Geográficos del Centro Geográfico del Ejército, Archivo Histórico Provincial de Huesca, Archivo Histórico Provincial de Zaragoza, Confederación Hidrográfica del Ebro, Comunidad de Regantes del Canal de Aragón y Cataluña, Instituto Cartográfico y Geológico de Cataluña-Centro Excursionista de Cataluña y Servicio Provincial de Carreteras de Huesca.
Inicio del Antropoceno (años 1956-1957)	Ortofotografías del vuelo AMS-B 1956-1957 del Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG).

2.3. Características físicas primigenias del río y su cuenca

Las variables que se han calculado para evaluar las características físicas del río y su cuenca, así como de algunas de las acciones antrópicas que han tenido lugar en el área de estudio son: distancia a la cabecera (km), altitud (m s.n.m.), pendiente (grados), anchura del fondo de valle (m), grado de confinamiento (%) – modificación de la clasificación del grado de confinamiento de Fryirs y Brierley (2010): confinado (100%), controlado por el margen (65%), controlado por la llanura (35%) y no confinado (0%)–, área de la cuenca vertiente (km²), altura media de la cuenca (m s.n.m.), pendiente media de la cuenca (grados), densidad de la red fluvial (km/km²), área de las clases litológicas de la cuenca (% de la cuenca) –rocas ígneas, rocas metamórficas, depósitos morrénicos, calizas y conglomerados, depósitos aluviales y otros materiales sedimentarios–, área de bosques y cultivos de la cuenca (% de la cuenca) y volumen embalsable de la cuenca (hm³). Estas variables se calcularon para las 177 unidades de 1 km de longitud en las que se dividió el río. En unos casos se obtuvieron a partir de un punto (por ej., área de la cuenca), en otras en función del punto de inicio y final (por ej., pendiente) y en otras mediante secciones perpendiculares al *bottom valley centerline* (por ej., anchura del fondo de valle).

2.4. Identificación de vectores de cambio naturales y antrópicos

Se ha analizado la relación entre los distintos patrones fluviales identificados, se ha estudiado su trayectoria evolutiva y también los factores físicos y antrópicos que han controlado su disposición en el espacio, tanto a escala de tramo como de cuenca. También se ha estudiado la secuencia espacial entre los diferentes patrones fluviales en época pre-industrial.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las formas históricas del cauce del río Cinca y sus pesos relativos se pueden observar en la Figura 2. En época preindustrial el 41% de las secciones totales del río tenían un patrón multi-canal. El patrón divagante se encontró en el 22% del río y las secciones sinuosas fueron las más frecuentes de los patrones de cauce único puro, representando casi un tercio del total (27%). Los cauces rectos fueron más escasos (8%) y no se encontraron secciones meandriformes. Las categorías efímera y proglacial estuvieron distribuidas de manera dispersa a lo largo del río, representando solo el 2 % del curso, y se ubicaron en la cabecera y en el valle de Pineta.

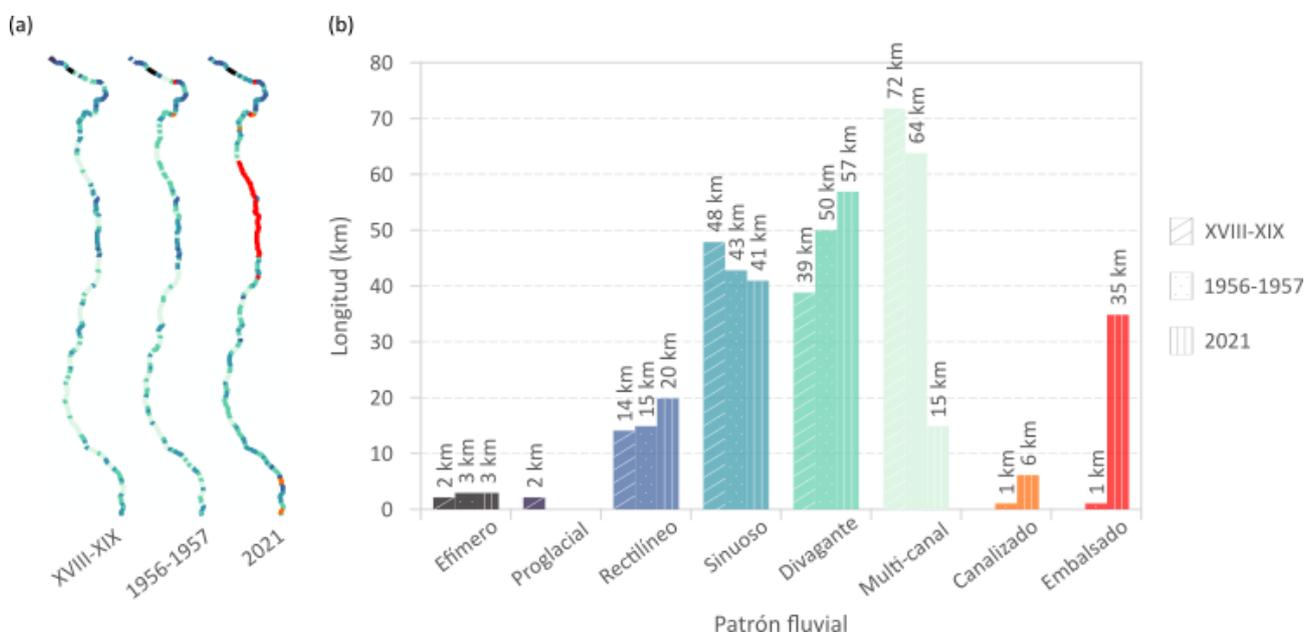


Figura 2. Distribución de los patrones fluviales del río Cinca en época preindustrial (siglos XVIII-XIX), al inicio del Antropoceno (1956-57) y en la actualidad (2021). (a) Localización y (b) longitudes.

Los patrones fluviales históricos seguían generalmente un gradiente aguas arriba-aguas abajo en función de las condiciones físicas, como puede apreciarse en la Tabla 2. Las variables en las que este gradiente

es más claramente visible son la distancia a cabecera, la anchura del fondo del valle, el área de la cuenca o la superficie ocupada por cultivos de la cuenca aguas arriba. En la mayoría de las variables analizadas, excepto en la densidad de la red fluvial, en gran parte de las clases litológicas y en el área relativa de la cuenca cubierta por bosques, se observan dos claras agrupaciones: por un lado, los patrones rectilíneos, proglaciares y efímeros, localizados cerca de la cabecera y, por otro, los patrones sinuosos, divagantes y multi-canales, distribuidos en el tramo inferior del río.

Tabla 2. Valores promedio obtenidos para los patrones de drenaje en época preindustrial (siglos XVIII-XIX).

<i>Variable</i>	<i>Efí- mero</i>	<i>Progla- ciar</i>	<i>Rectilí- neo</i>	<i>Si- nuoso</i>	<i>Diva- gante</i>	<i>Multi- canal</i>
Distancia a cabecera (km)	8,5	1,5	32,8	86,4	95,0	103,1
Altitud (m s.n.m.)	1248,3	2670,1	1036,0	418,3	440,2	326,8
Pendiente (%)	1,5	13,2	10,9	0,6	0,6	0,4
Anchura del fondo de valle (m)	344,0	2,5	95,7	719,4	1150,5	1438,9
Grado de confinamiento (%)	65,0	82,5	100,0	51,8	38,2	34,4
Área de drenaje (km ²)	37,4	2,5	682,1	3500,0	3984,2	4173,7
Altitud media de la cuenca (m s.n.m.)	2177,0	2791,5	1930,0	1383,7	1348,1	1247,4
Pendiente media de la cuenca (grados)	31,4	23,6	28,7	23,1	22,2	21,2
Densidad de la red fluvial (km/km ²)	1285,2	1756,6	1319,5	1265,4	1281,2	1341,5
Área de cuenca cubierta por rocas ígneas (%)	0,0	0,0	5,1	4,6	3,3	3,3
Área de cuenca cubierta por rocas metamórficas (%)	28,0	0,0	11,9	7,7	8,1	5,3
Área de cuenca cubierta por morrenas (%)	5,5	23,0	6,6	0,8	1,2	0,5
Área de cuenca cubierta por calizas y conglomerados (%)	30,5	0,0	24,8	28,3	28,3	26,2
Área de cuenca cubierta por depósitos aluviales (%)	7,0	0,0	6,2	9,6	10,7	9,9
Área de cuenca cubierta por otros depósitos sedimentarios (%)	28,5	76,5	44,1	48,3	47,6	53,9
Área de cuenca cubierta por bosque (%)	10,0	0,0	18,2	20,0	17,3	17,6
Área de cuenca cubierta por cultivos (%)	0,0	0,0	7,2	24,2	27,2	28,7
Volumen embalsable (hm ³)	0,0	0,0	0,0	0,6	0,5	0,4

En cuanto a la continuidad/contigüidad de los patrones fluviales identificados en los siglos XVIII-XIX (Figura 3), destacan las diferencias entre dos tipos de patrón: los multi-canales y los divagantes. El primero de ellos suele distribuirse en tramos de varios kilómetros consecutivos, es decir, los tramos multi-canal suelen preceder a los tramos de la misma categoría (esto ocurre en el 60% de los casos). Por el contrario, la categoría divagante se distribuye de forma dispersa, intercalándose entre otros tipos de patrón fluvial (sólo en el 18% de los casos un tramo divagante precede a otro del mismo tipo). En cuanto a los demás patrones fluviales, se observa que tienen la misma probabilidad de sucederse (en el 50% de los casos para las categorías proglaciar y efímero, y en el 43% y 46% para los patrones rectilíneos y sinuosos, respectivamente).

Entre los principales vectores de cambio que han dado lugar a la evolución morfológica del río cabe destacar que la población dedicada al sector agrícola y ganadero en la provincia de Huesca (área administrativa en la que se encuentra la cuenca, que ocupa el 62% de su superficie) ha disminuido desde los 82.569 trabajadores en 1860 hasta los 13.100 en 2020, siendo la fase de mayor descenso la comprendida entre 1960 y 1980. El ganado ovino, tradicionalmente predominante en la región, ha visto reducida su proporción de rebaños trashumantes (que se desplazaban entre el Pirineo –verano– y la Depresión del Ebro –invierno–) del 57% en 1865 al 18% en la década de 2000 en el Pirineo oscense. Además, la superficie ocupada por bosques y por cultivos en la cuenca del Cinca ha evolucionado inversamente entre los años 1869 y 2018: ha crecido la superficie forestal, especialmente entre los años 1950 y 2000 (13 km²/año) y el peso de los cultivos ha disminuido, aunque más lentamente (8 km²/año) sobre el conjunto del periodo. La reducción de la superficie agrícola en las tierras altas de la cuenca se ha compensado parcialmente con el cultivo de nuevas tierras en las llanuras, asociado al regadío desarrollado a partir de los grandes embalses construidos en la cuenca.

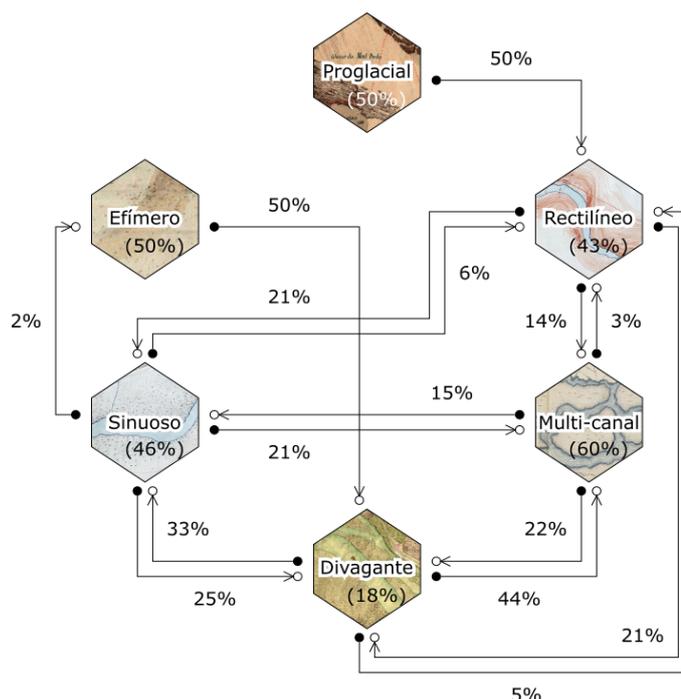


Figura 3. Secuencias de sucesión entre los diferentes patrones fluviales del río Cinca identificados en los siglos XVIII-XIX. Los porcentajes se refieren al número total de sucesiones de cada patrón. En el interior de los hexágonos, y entre paréntesis, se muestra la proporción de tramos que van a su propio tipo fluvial. Acompañando a las flechas exteriores se muestran los porcentajes en los que la sucesión se produce hacia un tipo fluvial distinto del de partida.

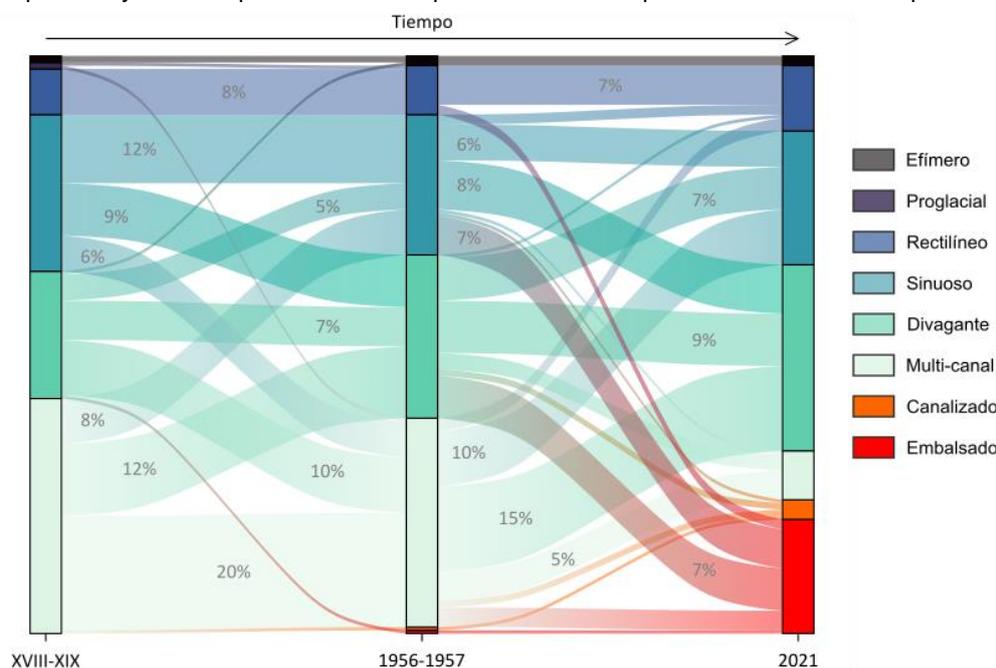


Figura 4. Diagrama de Sankey sobre la sucesión de un tipo de patrón fluvial a otro en los tres periodos de análisis. Los porcentajes se refieren al curso total del río (100% = 177 km). Sólo se muestran las cifras iguales o superiores al 5%.

La Figura 4 muestra cómo han evolucionado los patrones fluviales entre la era preindustrial, el inicio del Antropoceno y la época actual. Entre los siglos XVIII-XIX a 1956-57 (primera etapa) y 1956-57 a 2021 (segunda etapa) se observa una gran inestabilidad morfológica, ya que sólo en el 47% y 29% de los tramos, respectivamente, el patrón de drenaje permanece inalterado entre las fechas de inicio y fin. El menor porcentaje de la segunda etapa (29%) se debe al aumento de la proporción de río artificializado (+22% de su cauce), que desde la época preindustrial hasta el inicio del Antropoceno es prácticamente irrelevante (+1%). Los cambios producidos entre los patrones fluviales naturales han sido de distinto signo en ambas etapas,

aunque presentan totales similares (51% en la primera etapa y 48% en la segunda). En ambas etapas se trata principalmente de patrones de cauce sinuoso, multi-canal y divagante, aunque en la segunda etapa también es destacable el patrón rectilíneo, con un incremento de longitud de 8 km.

Cuantitativamente, entre los siglos XVIII y XIX y la década de 1950 se produjo un equilibrio absoluto en la transición de los patrones de canal desde categorías más complejas (multi-canales y divagantes) a otras más simples (tipos monocanales). Por otro lado, entre los años 1950 y 2020, se observa una tendencia a la simplificación de las formas fluviales, representando el 72% del total de las migraciones entre patrones de cauces naturales. La clase multi-canal es la más afectada en este periodo, pasando a categorías más simples en el 47% del curso fluvial. En sentido inverso, sólo el 3% del curso fluvial se desplaza hacia un patrón multi-canal. En cuanto a las categorías minoritarias, el patrón proglacial desaparece por completo entre los siglos XVIII-XIX y la década de 1950, mientras que el efímero aumenta 1 km de longitud en este mismo periodo para permanecer estable en la segunda etapa analizada.

4. CONCLUSIONES

El presente estudio evidencia la importancia de los ríos como indicadores útiles de los cambios humanos y ambientales en el territorio y cómo desde un análisis de geomorfología fluvial, centrado en los patrones de cauce o estilo fluvial, y sobre bases cartográficas y fotogramétricas, pueden explicarse dichos cambios, sus factores y sus efectos. El río Cinca es un ejemplo paradigmático para explicar los cambios ocurridos en cuencas con áreas de montaña y de llanura y con una alta presencia de embalses y elementos de regulación. Los resultados obtenidos ponen de manifiesto una profunda simplificación del paisaje fluvial, perdiéndose gran parte de los ambientes que presentaban una morfología compleja (patrón multi-canal) entre la época preindustrial, cuando se daba en un 41% del curso del río Cinca, hasta nuestros días, cuando solo representa un 8%.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer al personal de los archivos consultados la ayuda recibida en la búsqueda de documentación cartográfica histórica, especialmente, al correspondiente al Archivo Histórico Provincial de Huesca.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Fryirs, K., Brierley, G. J. (2010). Antecedent controls on river character and behaviour in partly confined valley settings: Upper Hunter catchment, NSW, Australia. *Geomorphology*, 117(1-2), 106–120. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.11.015>
- Fryirs, K.A., Brierley, G.J. (2013). *Geomorphic Analysis of River Systems: An Approach to Reading the Landscape*, John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781118305454>
- García J.H., Dunesme, S., Piégay, H. (2020). Can we characterize river corridor evolution at a continental scale from historical topographic maps? A first assessment from the comparison of four countries. *River Res Applic.*, 36, 934–946. <https://doi.org/10.1002/rra.3582>
- Hohensinner, S., Egger, G., Muhar, S., Vaudor, L., Piégay, H. (2021). What remains today of pre-industrial Alpine rivers? Census of historical and current channel patterns in the Alps. *River Res Applic.*; 37, 128–149. <https://doi.org/10.1002/rra.3751>
- Piégay, H., Alber, A., Slater, L., Bourdin, L. (2009). Census and typology of braided rivers in the French Alps. *Aquatic Sciences*, 71(3), 371–388. <https://doi.org/10.1007/s00027-009-9220-4>
- Rădoane, M., Perşoiu, I., Chiriloeai, F., Cristea, I., Robu, D. (2017). “Styles of Channel Adjustments in the Last 150 Years”. En M. Rădoane, A. Vespremeanu-Stroe, (Eds.), *Landform Dynamics and Evolution in Romania* (pp. 489-518), Springer Geography, https://doi.org/10.1007/978-3-319-32589-7_21
- CHE (2008). *Plan hidrológico del río Cinca*. Gobierno de Aragón. 284 pp.

Cartografía mediante imágenes PRISMA de la composición mineralógica de la Sierra Minera de Cartagena-La Unión (Murcia, sureste de España)

I. Pereira¹, E. García-Meléndez¹, M. Ferrer-Julilà¹, H. van der Werff², F. van der Meer²

¹ Grupo de Investigación Geología Ambiental, Cuaternario y Geodiversidad (Q-GEO), Facultad de Ciencias Biológicas y Ambientales, Universidad de León. Campus de Vegazana, s/n, 24071, León, España.

² University of Twente, Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation (ITC), Hengelostraat 99, 7500 AE Enschede, The Netherlands

iperr@unileon.es, <https://orcid.org/0000-0002-7328-4791>

eqarm@unileon.es, <https://orcid.org/0000-0001-8217-8205>

mferi@unileon.es, <https://orcid.org/0000-0001-8021-1040>

h.m.a.vanderwerff@utwente.nl, <https://orcid.org/0000-0002-2871-3913>

f.d.vandermeer@utwente.nl, <https://orcid.org/0000-0002-8755-3518>

RESUMEN: En el sureste de la Península Ibérica, las temperaturas han aumentado notablemente desde los años ochenta, alterando el régimen de precipitaciones con eventos torrenciales más frecuentes e intensos, seguidos de largos periodos de sequía. Esta dinámica climática es una de las principales preocupaciones en relación a la degradación del suelo en los países mediterráneos. La Sierra Minera de Cartagena-La Unión (Murcia, España) se ve directamente afectada por estas precipitaciones torrenciales que causan erosión extrema y pérdida de sedimentos. Esta situación se agrava debido a la acumulación de residuos mineros en las cabeceras de los cauces, materiales fácilmente erosionables que se transportan a las áreas agrícolas adyacentes.

Estos materiales mineros son espectralmente activos y se pueden cartografiar mediante teledetección. La investigación utilizó una imagen de junio de 2023 del satélite hiperespectral PRISMA de la Agencia Espacial Italiana (ASI) para cartografiar óxidos e hidróxidos de hierro, yeso y arcillas. PRISMA opera en el rango espectral de 400 a 2500 nm con 239 bandas. Se empleó un producto L2D de PRISMA, que es una imagen corregida atmosféricamente con valores de reflectancia en la superficie terrestre (BOA). La respuesta espectral de los minerales se estudió mediante cocientes de bandas. El método demostró la capacidad de PRISMA para cartografiar la distribución mineralógica en la zona. Los resultados fueron validados comparando con curvas espectrales de muestras de suelo medidas en laboratorio y análisis mineralógicos (DRX).

Palabras-clave: Óxidos e hidróxidos de hierro, Arcilla, Yeso, Hiperespectral

1. INTRODUCCIÓN

El sureste de la Península Ibérica, al igual que otras regiones mediterráneas, está experimentando un aumento de las temperaturas, lo que está modificando los patrones de precipitación (IPCC, 2014). Esta alteración está dando lugar a eventos torrenciales más frecuentes e intensos, seguidos de extensos periodos de sequía.

La Sierra Minera de Cartagena-La Unión, conocida por su historia minera, es una de las regiones más vulnerables a este aumento en los eventos de precipitaciones torrenciales. En esta área las precipitaciones torrenciales impactan sobre suelos afectados por la actividad minera y sobre residuos mineros acumulados, provocando una erosión acelerada y la pérdida de suelo fértil. La erosión de estos residuos mineros no solo contribuye a la degradación del suelo, sino que también incrementa el riesgo de transporte de sedimentos contaminados a las zonas agrícolas adyacentes, afectando la productividad y la salud del suelo. Estos materiales son fácilmente erosionables y liberan metales pesados y otros elementos tóxicos al medio ambiente.

Muchos de estos residuos mineros forman parte de minerales y metales secundarios que son espectralmente activos y poseen características de absorción electrónica y vibracional y altos contenidos en óxidos de hierro, que son reflejados en su curva espectral permitiendo su cartografía por técnicas de teledetección

(Riaza et al., 2011; Pan et al., 2022). Estas características espectrales pueden ser también identificadas en las áreas de sedimentación fluvial y, de esta manera, analizar la distribución de esos minerales desde las zonas de escombreras de residuos a las zonas de sedimentación donde dichos minerales son depositados por la dinámica fluvial.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

La cuenca de la Rambla del Beal, con una extensión de 8.7 km², se encuentra en el distrito minero de la Sierra Minera de Cartagena (Región de Murcia). Esta sierra limita al norte con el Campo de Cartagena y al sur con el Mar Mediterráneo. La Sierra Minera forma parte de las Zonas Internas de la Cordillera Bética, también conocida como "Dominio de Alborán", caracterizada por rocas con diversos grados de metamorfismo y una compleja disposición de sierras y cuencas sedimentarias. La mineralización principal incluye dos depósitos masivos de sulfuros, conocidos localmente como mantos, que fueron explotados en el pasado (García, 2004). La actividad minera ha dado lugar a acumulaciones de desechos ricos en sulfuros que, mediante procesos de meteorización, generan productos supergénicos como óxidos e hidróxidos de Fe y Mg, carbonatos y sulfatos hidratados.

La Rambla del Beal, vía de drenaje que desemboca en el Mar Menor, nace en la Peña del Águila y recorre 8 km, atravesando cumbres y valles, y pasando cerca de Llano del Beal y El Beal, donde se encuentran los principales depósitos mineros. Tras El Beal, la rambla se ensancha y pasa por las Salinas de Lo Poyo, un área de interés comunitario y zona de especial protección para las aves (ZEPA). La cuenca de la Rambla del Beal es una de las más contaminadas en el entorno del Mar Menor, con aproximadamente el 10.5% de su superficie ocupada por escombreras (García, 2004).

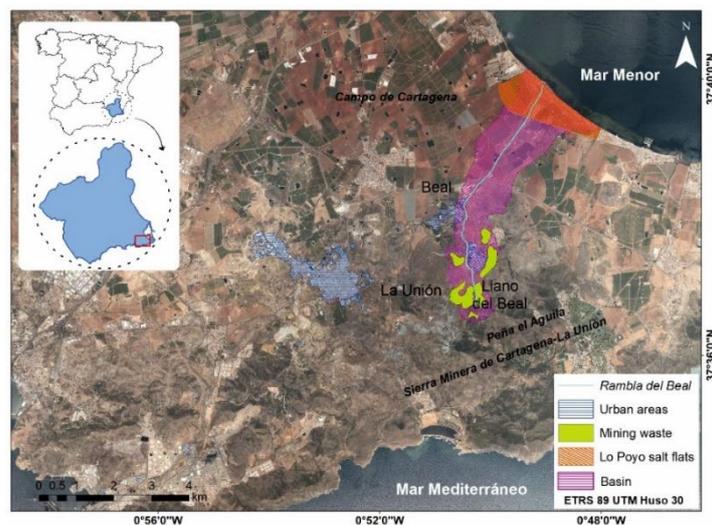


Figura 9. Localización del área de estudio

La Sierra Minera de Cartagena presenta un clima mediterráneo semiárido, con precipitaciones muy irregulares: máximas en otoño y sequías marcadas en verano, con un índice de aridez de 12 según Martonne. La precipitación anual promedio es inferior a 300 mm, mostrando variabilidad tanto intra-anual (tormentas) como inter-anual (sequías). La evapo-transpiración potencial anual supera los 900 mm.

2.2. Obtención y pre-tratamiento de las imágenes

PRISMA, un sensor hiperespectral lanzado por la Agencia Espacial Italiana (ASI) en marzo de 2019, proporciona 239 canales espectrales en un rango de longitudes de onda de 400 a 2500 nm (Bedini y Chen, 2022). Funciona como un sensor de barrido lateral ("push-broom") con una resolución espacial de 30 m para las bandas hiperespectrales y 5 m para la banda pancromática. PRISMA ofrece información espectral en las regiones VNIR (66 canales de 400 a 1100 nm) y SWIR (173 canales de 920 a 2500 nm), con un ancho espectral de ≤ 14 nm y una precisión de calibración de ± 0.1 nm. Cada escena cubre un área de 30 x 30 km, y el satélite tiene un tiempo de revisita de 29 días.

Para esta investigación, se adquirió una escena de nivel 2D de junio de 2023 de PRISMA con un 0% de cobertura de nubes desde el portal de ASI (<https://prisma.asi.it/>). Las imágenes de nivel 2D están corregidas atmosféricamente y ortorrectificadas (formato he5), correspondiendo a valores de reflectancia en la parte inferior de la atmósfera. De la región de longitud de onda superpuesta entre los canales de los espectrómetros VNIR y SWIR, solo se utilizaron las bandas del cubo VNIR, considerando un total de 230 bandas.

Las imágenes fueron enmascaradas inicialmente para minimizar el impacto de la vegetación en la forma de la característica de absorción de hierro y para eliminar el ruido de las masas de agua (tanto del mar Mediterráneo como del Mar Menor). Se calcularon los índices de vegetación y agua, NDVI y NDWI, respectivamente. Los píxeles fuera del rango de 0.0-0.3 DN para la vegetación y fuera del rango de 0.0-1.0 DN para las masas de agua fueron enmascarados y eliminados de la imagen.

2.3. Análisis espectral de las imágenes

Para el estudio de las arcillas, el yeso y los óxidos e hidróxidos de hierro de la zona de estudio se escogió la técnica de cociente de bandas, que consiste en dividir el valor del número digital (DN) de una banda espectral por el de otra. Esto realza las diferencias espectrales entre bandas y minimiza las influencias topográficas.

- *Cociente para arcillas*

Las arcillas exhiben características de absorción distintivas aproximadamente en 1400 nm, 1900 nm y 2200 nm. Sin embargo, los dos primeros rasgos se superponen con el vapor de agua atmosférico, lo que impide su uso en el análisis de teledetección. La característica de 2200 nm, atribuida al estiramiento OH y la flexión Al-OH, es por lo tanto el principal indicador espectral para las arcillas (Ec.1) (Robertson et al., 2016; Santamaría-López et al., 2024).

$$\text{Cociente para las arcillas} = \frac{R_{2206}}{R_{2135}} = \frac{B_{133s}}{B_{124s}} \quad (1)$$

donde R es el valor de reflectancia en nm y B es la banda espectral correspondiente de PRISMA.

- *Cociente para yeso*

El yeso presenta varios rasgos de absorción en la región espectral SWIR, alrededor de 1500 nm, 1750 nm y 2200 nm. El rasgo más importante es alrededor de 1500 nm; sin embargo, este se superpone con la absorción del vapor de agua atmosférico, lo que no lo hace adecuado para aplicaciones de teledetección. En el caso del rasgo de 2200 nm puede confundirse con la absorción de arcilla (Robertson et al., 2016; Santamaría-López et al., 2024), especialmente en mezclas de suelo. Por lo tanto, el rasgo de absorción de 1750 nm es el más efectivo para la identificación del yeso (Ec. 2).

$$\text{Cociente para el yeso} = \frac{R_{1667}}{R_{1746}} = \frac{B_{72s}}{B_{80s}} \quad (2)$$

donde R es el valor de reflectancia en nm y B es la banda espectral correspondiente de PRISMA.

- *Cociente para óxidos e hidróxidos de hierro*

Para identificar los óxidos e hidróxidos de hierro, se utilizaron las características espectrales indicadas Rowan y Mars (2003), en este caso el pico de reflectancia en la longitud de onda roja (650-700 nm) y la disminución en la región verde (500-570 nm) que exhiben estos minerales. Rowan y Mars (2003) propusieron un cociente de bandas (Ec. 4) basado en estas características. Este cociente, sensible a los colores visibles, se utiliza para clasificar los óxidos e hidróxidos de hierro (hematites, goethita y jarosita) según su respuesta de color visible. Los valores altos indican tonos rojos (ricos en hematites), los valores intermedios indican tonos verdes (ricos en jarosita) y los valores bajos corresponden a tonos amarillentos (ricos en goethita).

$$\text{Cociente para óxidos e hidroxidos de hierro} = \frac{\text{Rojo}}{\text{Verde}} \quad (3)$$

donde Rojo se corresponde con las Bandas 22 a la 26 (542-572 nm) y Verde con las Bandas 46 a la 51

(655-685 nm) de PRISMA.

2.4. Validación con difracción de rayo X

Para la validación e interpretación de los resultados de teledetección, se utilizó la Difracción de Rayos X (DRX). La DRX es una técnica no destructiva que utiliza rayos X para identificar minerales en muestras de roca o suelo en polvo. Los rayos X interactúan con la estructura cristalina del mineral, creando un patrón de difracción único para cada mineral. En este estudio, se utilizó un difractómetro de rayos X Bruker D2 PHASER para analizar las 12 muestras de suelo en polvo con el fin de identificar y cuantificar las fases minerales.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Arcillas

La Figura 2 muestra el resultado del cociente de bandas para la identificación de minerales de arcilla, que predominan en la zona distal del abanico aluvial. Estas arcillas, a pesar de no ser directamente contaminantes se sabe que son capaces de adsorben metales pesados como Ni, Co, Cu, As o Fe en su estructura (Santamaría-López et al., 2024).

El mapa de distribución de arcillas (Figura 2) revela un patrón espacial heterogéneo, caracterizado por un efecto de "sal y pimienta", probablemente atribuible a las limitaciones del sensor PRISMA en longitudes de onda más largas, según lo reportado por Bedini y Chen (2022). A pesar de estas limitaciones, es posible identificar algunas tendencias generales en la distribución espacial de las arcillas.

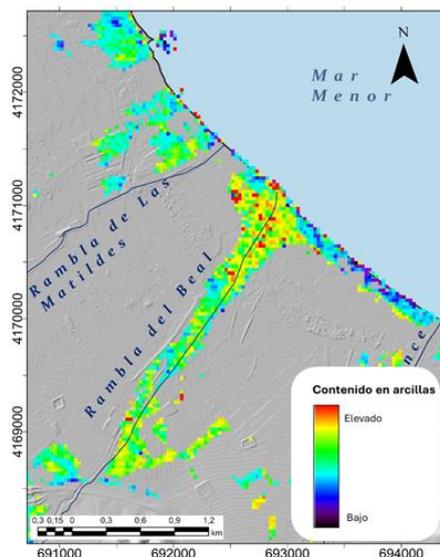


Figura 2. Cociente B133s/B124s para la identificación de minerales de arcilla

3.2. Yeso

La Figura 3 muestra un aumento gradual en la concentración de yeso hacia la desembocadura de la Rambla del Beal. No obstante, se observa una banda de menor concentración que posiblemente corresponda con un sendero peatonal, sugiriendo una perturbación local en la distribución del mineral. La presencia de yeso en un ambiente sedimentario nos indica condiciones de evaporación, que marca las zonas en las que se favorece la formación de otros sulfatos como la copitate, la melanterita y la hexahidrita (Robertson et al., 2016). Estos minerales secundarios, en función de su composición química, pueden contener metales pesados y otros elementos potencialmente tóxicos.

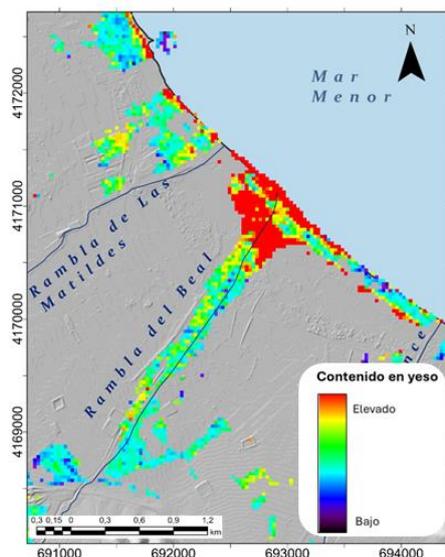


Figura 10. Cociente B72s/B80s para la identificación de yeso.

3.3. Óxidos e hidróxidos de hierro

La Figura 4 muestra los resultados del cociente de bandas para la identificación de sedimentos de óxidos e hidróxidos de hierro. En este caso, la jarosita es el mineral dominante. La hematita se encuentra en dos áreas de la cuenca: una pequeña región junto a suelos agrícolas en el suroeste de la imagen y un depósito en el área noroeste de la desembocadura de la cuenca. La goethita es escasa, con un depósito en el área noreste de la desembocadura de la cuenca. Este patrón muestra las áreas de oxidación-reducción (Pereira, et al. 2023).

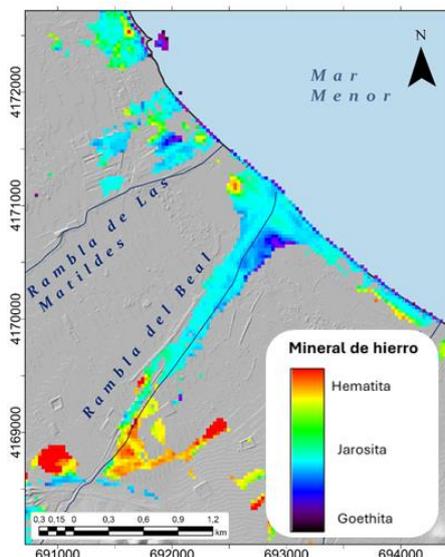


Figura 4. Cociente B22-26v/B46-51v para la identificación de óxidos de e hidróxidos de hierro.

3.4. Validación

La comparación entre los datos de XRD y PRISMA revela una fuerte correlación en la identificación de óxidos e hidróxidos de hierro. En todos los casos donde XRD detectó hematita, goethita o jarosita, PRISMA coincidió con esta identificación. Sin embargo, cuando XRD identificó múltiples fases de hierro en una misma muestra, PRISMA clasificó el píxel según la fase dominante.

En cuanto al yeso, se observó una concordancia en las doce muestras entre ambas técnicas. Para los minerales de arcilla, como la illita y la caolinita, la correlación fue en general buena, especialmente cuando

estos minerales eran abundantes. No obstante, PRISMA mostró limitaciones en la detección de fases minoritarias o cuando las arcillas no eran el componente principal de la muestra, en tres de las doce muestras no hubo correspondencia entre ambas técnicas.

4. CONCLUSIONES

El presente estudio ha demostrado la eficacia de la teledetección hiperespectral, utilizando el sensor PRISMA, para cartografiar la distribución espacial de minerales en la Sierra Minera de Cartagena-La Unión. Los resultados obtenidos muestran una alta correlación entre los datos de PRISMA y los análisis de laboratorio (DRX), lo que valida la utilidad de esta técnica para identificar y cartografiar óxidos e hidróxidos de hierro, yeso y arcillas. Sin embargo, es importante destacar algunas limitaciones, como la dificultad para detectar fases minoritarias de minerales y la influencia de factores atmosféricos en la adquisición de los datos.

La distribución espacial de estos minerales muestra una clara relación con la geología y la historia minera de la zona. Los óxidos de hierro, especialmente la jarosita, se concentran en áreas con mayor influencia de la actividad minera, mientras que las arcillas predominan en las zonas de sedimentación. La presencia de yeso indica condiciones de evaporación y la formación de otros sulfatos secundarios, lo que sugiere un potencial riesgo de contaminación por metales pesados.

AGRADECIMIENTOS

Investigación financiada por el proyecto HYPOROCKS-PDC2021-121352-100 financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por la Unión Europea "NextGenerationEU"/PRTR y por *Proyecto HYPE-RLANDFORM (PID2023-150229OB-100) financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación y Universidades*. La participación de I. Pereira ha sido posible por el contrato predoctoral FPU (FPU21/04495).

5. BIBLIOGRAFÍA

- Bedini, E., y Chen, J. (2022). Application of PRISMA satellite hyperspectral imagery to mineral alteration mapping at Cuprite, Nevada, USA. *Journal of Hyperspectral Remote Sensing*, 124–130.
- García, M. A. (2004). Impacto y riesgo ambiental de los residuos minero-metalúrgicos de la Sierra de Cartagena-La Unión (Murcia-España) [Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cartagena]. Repositorio digital de la Universidad Politécnica de Cartagena. <https://repositorio.upct.es/bitstream/10317/789/1/cgg.pdf>
- IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- Pan, Y., Fu, Y., Liu, S., Ma, T., Tao, X., Ma, Y., Fan, S., Dang, Z., y Lu, G. (2022). Spatial and temporal variations of metal fractions in paddy soil flooding with acid mine drainage. *Environmental Research*, 212, 113241. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113241>
- Pereira, I., Alcalde-Aparicio, S., Ferrer-Julà, M., Carreño, M. F., y García-Meléndez, E. (2023). Monitoring sedimentary areas from mine waste products with Sentinel-2 satellite images: A case study in the SE of Spain. *European Journal of Soil Science*, 74(1), e13336.
- Riaza, A., Buzzi, J., García-Meléndez, E., Carrère, V., y Müller, A. (2011). Monitoring the Extent of Contamination from Acid Mine Drainage in the Iberian Pyrite Belt (SW Spain) Using Hyperspectral Imagery. *Remote Sensing*, 3(10), 2166-2186. <https://doi.org/10.3390/rs3102166>
- Robertson, K. M., Milliken, R. E., y Li, S. (2016). Estimating mineral abundances of clay and gypsum mixtures using radiative transfer models applied to visible-near infrared reflectance spectra. *Icarus*, 277, 171-186. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2016.04.034>
- Rowan, L. C., y Mars, J. C. (2003). Lithologic mapping in the mountain pass, California area using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) data. *Remote Sensing of Environment*, 84, 350-366.
- Santamaría-López, A., Suárez, M., y García-Romero, E. (2024). Detection limits of kaolinites and some common minerals in binary mixtures by short-wave infrared spectroscopy. *Applied Clay Science*, 250, 107269. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2024.107269>

Diseño de herramientas de visualización y modelado de datos de tráfico para la toma de decisiones informada

L. Pérez López^{1, 2}, R. Cajo Esteban¹, J. Elía García³, A. Ruiz Varona¹

¹ Grupo de Investigación Arquitecturas OpenSource, EARTE, Universidad San Jorge, Zaragoza, autovía A.23, Km. 299, 50830 Villanueva de Gállego, Zaragoza.

² Instituto de Física Interdisciplinar y Sistemas Complejos, Universidad de las Islas Baleares, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Campus Universitat de les Illes Balears Carretera de Valldemossa, km 7,5 Edificio Científico-Técnico, 07122 Palma de Mallorca, Islas Baleares.

³ Consorcio de Transporte del Área Metropolitana de Zaragoza. Parque Roma Bloque B-4, bajos. 50010, Zaragoza

lperezlopez@usj.es, <https://orcid.org/0009-0001-4701-6128>

rcajoe@usj.es, <https://orcid.org/0000-0001-7705-9084>

jelia@ctaz.es, <https://orcid.org/0009-0001-7639-1314>

nruiz@usj.es, <https://orcid.org/0000-0001-8807-4917>

RESUMEN:

En un entorno urbanizado en el que debemos dirigir esfuerzos hacia una neutralidad climática en un corto espacio de tiempo, es esencial medir y conocer cómo pueden reducirse los impactos de la actual movilidad urbana e interurbana, sin eliminar la posibilidad de decidir cómo nos desplazamos. Esta movilidad en las ciudades genera un conjunto elevado de datos. Su uso permite generar una información útil a la hora de conocer cómo nos desplazamos, desde los propios dispositivos móviles que empleamos para saber hacia dónde nos desplazamos individualmente, hasta terminales informativos que dan razón de los recorridos alternativos a los que podemos optar dependiendo de la forma en la que nos queramos desplazar.

La dificultad radica en la gestión de estos datos, generados por diversas fuentes, en ocasiones de difícil acceso y escasa normalización. El reto de su integración y armonización es fundamental si queremos interpretar con sentido su significado y conocer los patrones de movilidad que generamos. Esto permite una mejora en la toma de decisiones desde una doble perspectiva: por un lado, como usuarios, porque debemos ser capaces de decidir cómo queremos desplazarnos; por otro lado, como expertos desde la planificación espacial, ante el desafío de mejorar nuestras ciudades y el impacto que la movilidad tiene en ellas.

En este sentido, el trabajo aquí presentado propone un doble objetivo. En primer lugar, estudiar la dinámica de movilidad en un entorno metropolitano definiendo un modelo que permita generar un conocimiento preciso de los flujos de movilidad y las emisiones contaminantes asociadas a los desplazamientos realizados. En segundo lugar, diseñar una herramienta de apoyo a la toma de decisiones informadas, interactiva e interoperable para conocer mejor las posibilidades de desplazamiento que tenemos y los costes asociados a los mismos. La usabilidad y la experiencia de usuario juegan un papel fundamental para el diseño de esta herramienta.

Este planteamiento toma como caso de estudio el área funcional de Zaragoza para el periodo 2010 - 2023, con aproximadamente 800.000 habitantes y una media de dos millones de desplazamientos diarios.

Los resultados obtenidos muestran cómo a través de la herramienta se pueden visualizar las dinámicas de movilidad del área de estudio, diferenciando distintas zonas de intensidad media de vehículos y su evolución y comportamiento temporal.

Palabras-clave: movilidad, planeamiento espacial, sostenibilidad urbana, Zaragoza

1. INTRODUCCIÓN

El impacto del cambio climático se ha visto reflejado en el aumento de 1,5°C de la temperatura con respecto a los niveles preindustriales suponiendo una amenaza de futuros fenómenos meteorológicos extremos y siendo a su vez el responsable de la erosión mundial de biodiversidad y, en consecuencia, de su pérdida (Ley europea del clima, 2021). Para frenar esta tendencia, desde el Acuerdo de París se ha llevado a cabo una

regulación de “las emisiones y absorciones de gases de efecto invernadero (...) que estarán equilibradas dentro de la Unión a más tardar en 2050” y teniendo como objetivo la neutralidad climática.

Para lograr este objetivo, un aspecto importante es reducir el impacto ambiental de la movilidad, sin limitar las posibilidades de desplazamiento. Para ello, se hace necesario un estudio que ayude a conocer los patrones de movilidad y las tendencias del parque de vehículos. Por ejemplo, Daniel Sperling (2018) argumenta la existencia de una triple revolución que se está produciendo en las políticas de movilidad urbana: existe una revolución hacia la electrificación, la automatización de vehículos y su uso compartido. La renovación del parque de vehículos impulsada por la tecnología va a favorecer la reducción de costes en tiempo, consumo y emisiones.

Para entender el efecto de estos cambios, es fundamental recopilar datos y estudiar la información asociada a ellos. La elevada generación diaria de los mismos y la dificultad de su integración hace necesario el uso de Tecnologías de la Información Geográfica (TIG). Estas tecnologías digitales se emplean como herramienta de toma de decisiones contribuyendo a que las ciudades sean cada vez más inteligentes, y el medio ambiente más equitativo y habitable (te Brömmelstroet, 2013; Staffans, Kahila-Tani, Geertman, Sillanpää, & Horelli, 2020).

Este trabajo emplea TIG para alcanzar un doble objetivo: en primer lugar, caracterizar las actuales dinámicas de movilidad y los costes medioambientales asociados a ellas. En segundo lugar, diseñar y crear una herramienta de apoyo a la toma de decisiones, interactiva e interoperable, que permita recrear escenarios para entender mejor cómo nos desplazamos, evaluando alternativas que reduzcan los costes, no sólo medioambientales, sino en términos de tiempo, energéticos o económicos (Ruiz-Varona, Blasco-Cubas, & Iglesias-Soria, 2023). Para ello, este estudio desarrolla dos plataformas de visualización mediante herramientas TIG.

Considerando que el modelo de movilidad es consecuencia de un modelo territorial determinado (Ortiz Taboada, 2022), el diseño del método se concreta para un caso específico de estudio (área funcional de Zaragoza), aunque puede ser extrapolado a otros ámbitos territoriales. Este método se presenta a continuación en una sección propia. Los resultados y conclusiones se presentan en dos secciones separadas.

2. METODOLOGÍA

El diseño de un modelo de datos, que proporcione información dinámica para un periodo de estudio y un ámbito espacial dados, precisa de trabajar los datos de número de vehículos por hora (información en bruto obtenida de las diferentes fuentes de datos) en determinados puntos (coordenadas X, Y) de forma que se pueda obtener una red continua en la que todos los segmentos cuenten con información asociada a la intensidad de vehículos. Una de las principales dificultades radica en la desigual cobertura de toda el área y en las diferentes formas de medida.

La Figura 1 representa el diseño metodológico seguido para la creación del modelo de datos, que se divide en tres etapas principales. En la primera, se realiza la recopilación de datos provenientes de diversas fuentes, como sensores de tráfico y registros manuales. Posteriormente, en la segunda etapa, los datos se procesan y organizan en una base de datos estructurada. Finalmente, en la tercera etapa, se procede con la selección y visualización de la información, generando una red continua de intensidades de tráfico proyectada en un sistema de información geográfica (SIG), lo que permite analizar patrones y áreas críticas del tráfico.

La zona de estudio queda delimitada al área funcional de Zaragoza con una extensión de aproximadamente 967 km² y una población total de alrededor 800.000 habitantes (Instituto Nacional de Estadística, 2024). Esta área queda organizada en seis corredores: central, norte, oeste, este, sur y cuarto cinturón, que es una vía de circunvalación construida para aligerar el tráfico del centro urbano. Esta área agrupa a los 32 municipios que conforman el área metropolitana de Zaragoza establecida territorialmente dentro de los límites del área consorcial (Figura 2).

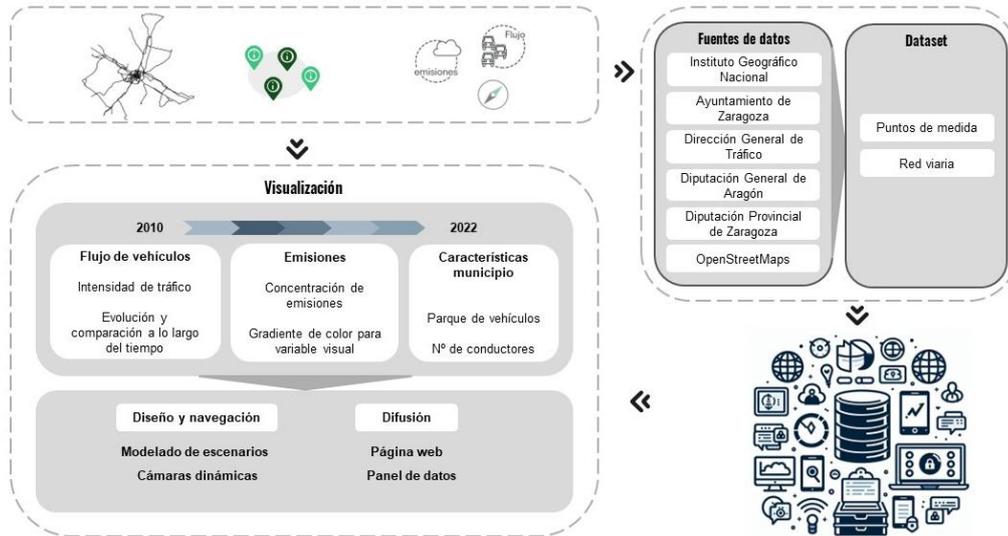


Figura 11. Mapa conceptual del proceso metodológico. Fuente: Autores (2024).

El objetivo del trabajo prioriza el ámbito interurbano, razón por la que la red urbana de Zaragoza, la ciudad central y capital de la provincia se ha simplificado, considerando los seis primeros niveles de jerarquía viaria definidos en el actual Plan de Movilidad Urbana Sostenible (PMUS) (Ayuntamiento de Zaragoza, 2019) y excluyendo las vías que tienen un marcado carácter de distribución a manzanas y sectores urbanos. Es decir, se priorizan las vías de acceso y circulación principal de la ciudad frente a las vías asociadas a una circulación asociada a acceso residencial y aparcamiento.

El diseño de la red considera las opciones de incorporación y salida, de forma que cada uno de los cruces determina el inicio y fin de los diferentes tramos o segmentos de los que consta esta red. Así, se obtiene un conjunto de 1.593,62 km totales de red distribuidos en 1.273 tramos.



Figura 12. Organización de la red viaria en corredores. Fuente: Autores (2024).

La red permite conocer relaciones de dependencia entre los diferentes tramos, según el sentido de las vías. Para establecer todo el conjunto de dependencias, así como los valores de intensidad de vehículos para cada uno de los tramos deben diferenciarse tres fases de trabajo: recopilación, integración y normalización de información de diversas fuentes para la creación de una base de datos; análisis de la información; visualización de la información.

1. Recopilación, integración y normalización de la información. Los datos facilitados por los diferentes organismos (servicio de movilidad del Ayuntamiento de Zaragoza, el Gobierno de Aragón, la Dirección General de Carreteras y la Dirección General de Tráfico) corresponden al número de

vehículos por hora, para determinados puntos de medida de la red viaria. En ocasiones, esta medición permite diferenciar tipo de vehículo (ligero o pesado) o incluso facilita información complementaria asociada a velocidad. Sin embargo, existen diferencias notables entre los datos facilitados que hacen necesario un proceso de integración y normalización de estos datos en bruto.

Los puntos de medida se distribuyen de manera desigual en torno a la red viaria, de forma que debe diferenciarse los tramos en los que existe punto de medida de aquellos que no. Incluso, teniendo en cuenta el periodo considerado (2010-2023), varios tramos no existían y no han sido incluidos para la serie temporal completa. La asignación directa del valor de estos puntos de medida sobre estos tramos permite depurar las relaciones de dependencia para el resto de ellos, de forma que su cálculo es resultado de un proceso de interpolación en el que se diferencia la calidad del dato inicial (Tabla 1).

Tabla 1. Clasificación de tramos según calidad del dato. Fuente: Autores (2024).

Nivel	Número de tramos	Tipo de aforo
1	226	Permanentes asignación directa
2	63	Permanentes calculados
3	486	Cobertura asignación directa
4	230	Cobertura calculados
5	23	Escasa información
6	245	Sin dato

El valor de intensidad de vehículos para cada uno de los tramos tiene asociado el de emisiones contaminantes. Si se tiene en cuenta que la tecnología del parque de vehículos durante el periodo considerado apenas ha cambiado en porcentaje, este valor será proporcional a su número. Lo interesante en esta etapa del trabajo residen en conocer la magnitud de aquellos elementos asociados al calentamiento global (CO₂) y, además, aquellos que afectan directamente a la salud de las personas, especialmente en entornos urbanizados (NO_x y PM).

2. Análisis de la información. El modelo de datos procesados y normalizados permite agrupar la información en diferentes periodos temporales, de tal forma que pueden detectarse patrones de movilidad objeto de estudio específico. Se han estudiado las dinámicas de intensidad de vehículos a escala horaria, diaria, mensual y anual, diferenciando, además, el tipo de día: laboral, vísperas de festivo o festivos.
3. Visualización. La representación de la información y de los patrones identificados es importante porque permite su interpretación y consulta. El diseño de cómo visualizarla ha seguido una doble perspectiva (te Brömmelstroet & Bertolini, 2008). Por un lado, la del ciudadano, donde se ha tratado de simplificar la información con criterios de usabilidad y fácil interacción para conocer los tipos de desplazamiento y emisiones asociadas; por otro lado, la del técnico, donde se ha propuesto una consulta detallada de los valores y la incorporación de variables derivadas asociadas al impacto de la movilidad en el entorno construido.

3. RESULTADOS

Los resultados de la intensidad media diaria (IMD) anual para el periodo de estudio (2010- 2023) para el último año con datos disponibles se representa en la Figura 3. Esta misma variable, agrupada en diferentes periodos temporales (mensual, tipo de día, horario) para un año específico, o en diferentes corredores ayuda a detectar tramos con mayor intensidad y comportamiento en el flujo de vehículos que puedan requerir de nuevas estrategias. Por ejemplo, las principales arterias de comunicación interurbana con la ciudad capital, como el cuarto cinturón (Z-40), muestran niveles de IMD significativamente más altos en comparación con las vías distribuidoras de la ciudad (Figura 4). Estas zonas de mayor intensidad determinan las zonas con una mayor afección de emisiones contaminantes.



Figura 13. Mapa IMD del área de estudio para el año 2023. Fuente: Autores (2024).

Los valores de movilidad obtenidos son representados siguiendo un diseño que dé respuesta a las demandas que puedan tener dos perfiles diferentes: un panel de datos para perfiles técnicos, que ofrece herramientas avanzadas de análisis; y una plataforma interactiva orientada al público en general, con una interfaz sencilla para consultar información relevante de manera accesible.

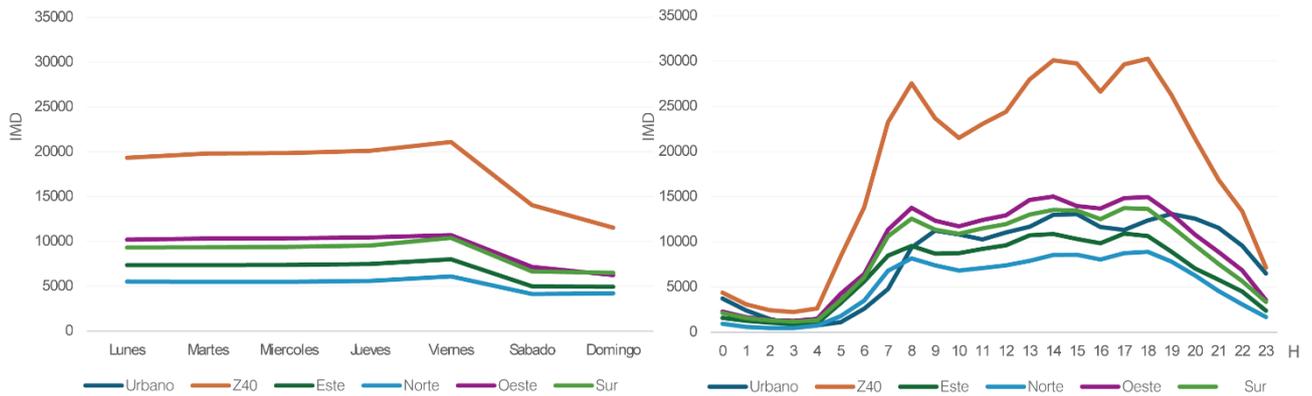


Figura 14. IMD para cada día y para cada hora por corredor para el año 2023. Fuente: Autores (2024).

El panel de datos, más técnico, en el que existe la posibilidad de seleccionar y comparar los valores de intensidad y número de vehículos para diferentes periodos temporales, así como otros valores asociados (censo y tipo de vehículos, índice de motorización o tipo de tecnología) para cada uno de los municipios que conforman el área de estudio. Este panel de datos está organizado en dos bloques, diferenciando la información geográfica, representada en un mapa del área funcional de Zaragoza, del análisis estadístico representado en distintos tipos de gráficos. La selección de datos puede descargarse en formato editable.

La plataforma interactiva, más dinámica, ha sido generada por un motor de videojuegos multiplataforma. Ofrece una experiencia plenamente visual para explorar con autonomía y comprender las dinámicas de desplazamiento. Incluye funciones para activar los valores de flujos de vehículos o los de emisiones, así como la selección espacial del ámbito a visualizar. Para que su visualización sea más comprensible, las funciones de brújula y cámaras fijas facilitan su navegación. Además, una barra temporal permite la representación dinámica de los valores, siendo más fácil comprender cuál ha sido su evolución a lo largo del tiempo. Los valores de intensidad (variables reales) son representadas haciendo uso del color y grosor como variables visuales que definen el código cartográfico empleado. Además, los municipios están etiquetados, y al seleccionarlos, se proporcionan datos sobre el parque de vehículos y los permisos de conducción.

En la parte derecha, una leyenda y una ventana desplegable muestran información gráfica del mapa para los años seleccionados (Figura 5).

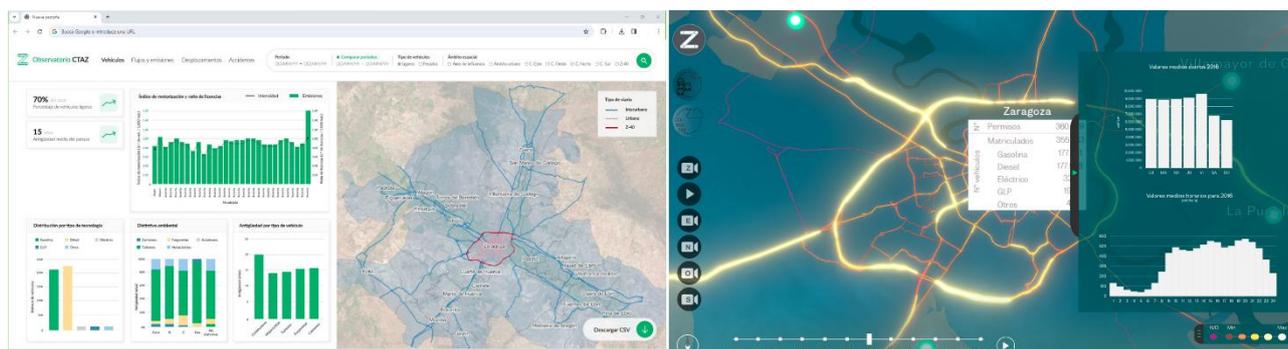


Figura 15. Panel de datos (izquierda) y plataforma interactiva (derecha). Fuente: Autores (2023).

El diseño de estas dos visualizaciones permite la representación gráfica de los valores de movilidad de forma que, en su manejo, puedan llegar a conocerse cuáles son las dinámicas de movilidad para el área funcional de Zaragoza. Incluso, haciendo uso de las herramientas de filtrado y selección, permiten detectar cuáles son los patrones de intensidad interurbana de vehículos y una magnitud aproximada de las emisiones contaminantes asociadas.

4. CONCLUSIONES

El estudio realizado aborda la complejidad del análisis y la gestión de los datos de movilidad urbana en el entorno funcional de Zaragoza. A través de la integración y la normalización de la información recogida de diversas fuentes de datos, se ha logrado crear una base estructurada que permite identificar zonas que presentan una mayor intensidad de vehículos. La recreación de las dinámicas de movilidad del área funcional de Zaragoza proporciona una perspectiva interesante sobre sus posibles impactos, lo que abre vías de trabajo para definir los patrones de movilidad en relación con el entorno construido, las actividades cotidianas desarrolladas, la población y la calidad ambiental del mismo. Esto es esencial para garantizar una planificación con sentido y toma de decisiones informadas en cuestiones de movilidad.

El uso de las TIG ha demostrado ser fundamental no solo para la recopilación y visualización de datos, sino también para la creación de plataformas de gestión y análisis de datos que permiten recrear su evolución o definir escenarios considerando determinados planteamientos hacia una necesaria consecución de neutralidad climática. Por ello, uno de los principales logros de este trabajo es la puesta a disposición de una plataforma de consulta y visualización de datos para, con ello, contribuir a un mejor diseño de políticas, a una gestión informada y a una planificación de la movilidad coordinada entre los múltiples actores que intervienen. Estos hallazgos no reflejan solo la situación actual, sino que también sientan las bases para futuras políticas y tomas de decisiones que busquen optimizar la movilidad urbana minimizando su impacto ambiental.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido financiada por el Consorcio de Transporte del Área de Zaragoza (CTAZ). Los datos han sido facilitados por el servicio de movilidad del Ayuntamiento de Zaragoza, el Gobierno de Aragón, la Dirección General de Carreteras y la Dirección General de Tráfico.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Agencia Europea de Medio Ambiente. (2019). *Monitoring of CO2 Emissions from Passenger Cars -Data 2019*. Obtenido de <https://www.eea.europa.eu/es>
- Ayuntamiento de Zaragoza. (2017). *Indicador de Tráfico y Movilidad Datos Abiertos*. Obtenido de <https://www.zaragoza.es/sede/servicio/siu/?indicador=datos-uso-automovil>
- Ayuntamiento de Zaragoza. (2019). *Plan de Movilidad Urbana Sostenible, Zaragoza. Movilidad Privada*. Obtenido de <https://www.zaragoza.es/sede/portal/movilidad/plan-movilidad/#docu%3E>
- Comisión Europea. (2021). *Regulation (EU) 2021/1119 of the European Parliament and of the Council of 30 June 2021 establishing the framework for achieving climate neutrality and amending Regulations (EC) No 401/2009 and (EU) 2018/1999 ('European Climate Law')*. Obtenido de <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32021R1119>

- Instituto Nacional de Estadística. (2024). *Cifras oficiales de población de los municipios españoles en aplicación de la Ley de Bases del Régimen Local (Art. 17)*. Obtenido de <https://www.ine.es/jaxiT3/Datos.htm?t=2907>
- Ministerio del Interior. (2023). *Portal estadístico. Dirección General de Tráfico*. Obtenido de https://se-deapl.dgt.gob.es/WEB_IEST_CONSULTA/subcategoria.faces
- Ortiz Taboada, J. (2022). Movilidad urbana y metropolitana en Zaragoza. En *Mobility Experience: Investigación, innovación y difusión en movilidad*. (págs. 61-76). Ediciones Universidad San Jorge.
- Ruiz-Varona, A., Blasco-Cubas, M., & Iglesias-Soria, A. (2023). Does Mobility Experience Matter? Insights from a. *Journal of Urban Technology*, 53-78.
- Sperling, D. (2018). *Three revolutions: Steering automated, shared, and electric vehicles to a better future*. Estados Unidos de América: IslandPress.
- Staffans, A., Kahila-Tani, M., Geertman, S., Sillanpää, P., & Horelli, L. (2020). Communication-Oriented and Process-Sensitive Planning Support. *IJEPR vol.9*, 1-20.
- te Brömmelstroet, M. (2013). Performance of Planning Support Systems: What is it, and how do we report on it? *Computers, Environment and Urban Systems*, 299-308
- te Brömmelstroet, M., & Bertolini, L. (2008). Developing land use and transport PSS: Meaningful information through a dialogue between modelers and planners. *Transport Policy*, 15(4), 251–259. <https://doi.org/10.1016/J.TRANPOL.2008.06.001>

Espacialización y geovisualización del riesgo a temperaturas altas extremas en Andalucía, mediante la integración en teselas regulares (GRID250) de variables de cambio climático y vulnerabilidad

I. Vallejo Villalta, J.M. Camarillo Naranjo, A. Prieto Campos, J. Ojeda Zújar

Departamento de Geografía Física y AGR, Universidad de Sevilla. C. Doña María de Padilla s/n, 41004 Sevilla.

ivallejo@us.es, <https://orcid.org/0000-0001-7077-259X>

jmcamarillo@us.es, <https://orcid.org/0000-0003-0152-6357>

pcampos@us.es, <https://orcid.org/0000-0001-6946-9622>

zujar@us.es, <https://orcid.org/0000-0002-4672-064X>

RESUMEN: La evaluación de la vulnerabilidad ha ganado peso en los estudios sobre riesgos naturales, por la evidencia de que la desigual distribución de daños por desastres se explica en gran parte por características del territorio, del espacio construido y de la sociedad que lo ocupa. A pesar de esta relevancia, permanecen abiertos debates conceptuales y metodológicos en torno a la vulnerabilidad: su tipología (física, social, económica), sus componentes (fragilidad, resiliencia), o los problemas de escala. En este trabajo se presentan resultados derivados de una línea de investigación dirigida a la generación de indicadores sintéticos de vulnerabilidad mediante la integración espacial de datos de múltiples fuentes de información, con varios objetivos: (i) Conceptualmente, contar una unidad de referencia espacial común posibilita la aplicación de diferentes técnicas para calcular indicadores integrados de vulnerabilidad, basados tanto en las variables contenidas, como en aquellas otras derivables de relaciones espaciales. (ii) Desde la óptica escalar, un GRID de 250 metros permite obtener una cartografía de vulnerabilidad de detalle, que posibilita la realización de análisis de riesgo, al aproximarse a la escala de los análisis de peligrosidad. (iii) La generación de clientes web interactivos (geovisores/dashboard) posibilita la ampliación de los usuarios potenciales. Para este caso, se ha obtenido la espacialización del riesgo frente a temperaturas altas extremas en Andalucía, basada en la integración en la estructura GRID250 de datos derivados de la aplicación de modelos y escenarios climáticos del 6º informe del IPCC, y de indicadores específicos de vulnerabilidad. Para la geovisualización se han generado clientes web con la plataforma CARTO.

Palabras-clave: vulnerabilidad, cambio climático, teselas regulares, clientes web, Andalucía.

1. INTRODUCCIÓN

La evaluación de la vulnerabilidad ha ido ganando peso en los estudios sobre riesgos naturales. Ello se deriva de la evidencia de que la desigual distribución espacial de los daños asociados a desastres naturales no puede explicarse únicamente por el comportamiento de los procesos físico-naturales, sino que las características del territorio, del espacio construido y de la sociedad que los ocupa juegan un papel crucial en ese desequilibrio distributivo (Cutter y Finch, 2008; Olcina, 2008). A pesar de este incremento de los estudios de vulnerabilidad, siguen existiendo debates conceptuales y metodológicos en torno a varios aspectos básicos, entre los que destacan los tipos de vulnerabilidad (física, social, económica), los componentes de la misma (fragilidad, resiliencia, capacidad de respuesta...), así como sobre las cuestiones relativas a la generación de indicadores sintéticos y a la escala de los análisis (Biswas y Nautyal, 2023).

En este trabajo se presentan algunos resultados derivados de una línea de investigación que persigue la generación de indicadores sintéticos de vulnerabilidad, mediante la integración espacial en teselas regulares (GRID) de datos procedentes de múltiples fuentes de información a través de procedimientos geoespaciales. A través de esta aproximación se persiguen dos objetivos básicos.

En primer lugar, desde un punto de vista conceptual, el hecho de contar con una unidad de referencia

espacial común que acoge un gran número y diversidad de datos geoestadísticos (catastrales, socio-demográficos, económicos) para toda Andalucía, posibilita la aplicación de diferentes técnicas para el cálculo de indicadores integrados, basados tanto en las variables contenidas en cada unidad, como en aquellas otras que pueden derivarse de relaciones espaciales entre las mismas.

En segundo lugar, desde la óptica escalar, al contar con un GRID de 250 metros de resolución se consigue obtener una cartografía de vulnerabilidad a escala de detalle, que posibilita la realización final de análisis de riesgo, al superarse en buena medida la falta de coincidencia espacial entre los análisis de peligrosidad (inundaciones, incendios, erosión...), de gran nivel de detalle espacial, y los de vulnerabilidad que suelen referirse a unidades administrativas (municipios, unidades censales, etc).

Como ejemplo de los resultados potenciales se muestra la generación de clientes web (geovisor), que permiten observar la espacialización de los niveles de riesgo frente a temperaturas altas extremas, esperables en Andalucía para algunos de los escenarios de cambio climático derivados del 6º informe del IPCC. La comunicación se inscribe en un contexto más amplio (<https://kerdes.cica.es/riskmacloud>), de cara a la generación de herramientas basadas en las TIG, que resulten de utilidad a un doble nivel, académico-científico, para mejorar nuestra comprensión sobre las pautas de distribución de riesgos y desastres, y como apoyo a la toma de decisiones que deben asumir administraciones, agentes económicos y ciudadanía.

2. METODOLOGÍA

La metodología se articula esencialmente en la aplicación más básica del análisis del riesgo, distinguiendo entre (i) las variables de peligrosidad, extraídas directamente de la Red de Información Ambiental de Andalucía (REDIAM), y (ii) las variables de vulnerabilidad, que proceden de varios repositorios administrativos que proporcionan datos catastrales y sociodemográficos de distinto tipo, a partir de los cuales se han elaborado indicadores. Como parte central de la metodología se contempla la integración de ambos grupos de variables en una unidad de referencia común, representada en este caso por una estructura regular de teselas de 250 metros de resolución (GRID250), proyectada en el sistema de referencia de coordenadas ETRS89 LAEA, que constituye una infraestructura oficial a nivel regional (Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía –IECA-) y europeo. Todos los procesos de integración, normalización, almacenamiento y análisis de la información se han desarrollado en un entorno PostgreSQL/PostGis.

2.1. Variables de peligrosidad. Temperaturas altas extremas

Esta variable procede de la aplicación SICMA (<https://andalucia.sicma.red/>), de la Consejería de Sostenibilidad, Medioambiente y Economía Azul, consistente en un geovisor que permite la visualización, consulta y descarga de una extensa variedad de datos sobre el comportamiento futuro de las principales variables climáticas. Estas variables resultan de proyecciones locales adaptadas de los escenarios (SSP) y modelos climáticos empleados en el 6º informe del IPCC. Concretamente, las variables climáticas disponibles son 84, calculadas para cuatro escenarios de gravedad creciente (SSP1-2.6; SSP2-4.5; SSP3-7.0; y SSP5-8.5), para siete periodos temporales distintos, y utilizando 10 modelos climáticos globales (MCG) diferentes. La espacialización de estas variables se lleva a cabo mediante el uso de una estructura ráster de 200 metros de resolución.

Este trabajo selecciona dos variables vinculadas a altas temperaturas extremas, representadas por el número de días anuales con temperatura máxima por encima de 40º (días Tmax >40), y número anual de olas de calor (días olas calor). El escenario elegido ha sido el más extremo de los cuatro disponibles (SSP5-8.5), mientras que el modelo climático empleado se corresponde con el del EC-Earth Consortium; respecto a los periodos temporales, se trabaja con un período histórico de 30 años (1985-2014), y un período futuro (2071-2100). La integración de estos datos en la rejilla se ha llevado a cabo a través de un simple procedimiento de asignación espacial de los valores ráster de clima a los centroides de las celdas del GRID250.

2.2. Variables de vulnerabilidad. Información socio-demográfica y catastral

Por lo que se refiere a las variables de vulnerabilidad, básicamente se parte de la consideración de su carácter específico, en el sentido de que se buscan variables que respondan a la mayor o menor sensibilidad para enfrentar condiciones de temperaturas altas extremas. Por otro lado, bajo esta premisa, se manejan dos componentes. De una parte, se ha considerado la vulnerabilidad física, vinculada esencialmente a las condiciones, contexto y localización de viviendas, y de otra, la vulnerabilidad social, que se apoya en información socio-demográfica y económica.

Por lo que se refiere a esta última, los datos demográficos proceden de la “Malla estadística de datos espaciales” distribuida por IECA, que proporciona variables demográficas de hogares y personas (sexo, edad,

nacionalidad, etc.), procedentes del Registro Longitudinal de Población de Andalucía (RLPA), para el año 2022. A estos datos se suma cierta información censal, en este caso sobre características y tipología edificatoria, integrada también por IECA en la misma malla común y, de la misma forma, para el caso de los datos sobre renta, información derivada del INE y la AEAT.

En el caso de la vulnerabilidad física, la información sobre las características de las viviendas se ha extraído de catastro, utilizándose para ello tanto el formato ATOM, como los archivos CAT (alfanuméricos). El uso combinado de ambas fuentes permite asociar los bienes inmuebles residenciales de cada parcela a una dirección postal y edificio, de forma que se extraigan variables como las viviendas totales, su superficie, tipología, etc (Noguero-Hernández et al, 2016). Posteriormente, las viviendas se agregan a la estructura de teselas GRID250. Al margen de las características propias de las viviendas, en esta misma estructura se incluye información sobre presencia de piscinas y espacios abiertos, o la vecindad de edificios de uso industrial, procedente también de catastro, así como otra información correspondiente a la accesibilidad viaria al frente costero (Ojeda, Prieto y Sánchez, 2024, en este mismo congreso).

2.3. Cálculo y geovisualización de indicadores

Para el caso de la vulnerabilidad, física y social, el procedimiento para la obtención de indicadores ha consistido simplemente en una estandarización de las variables que participan en cada tipología (Gayen, 2023), para finalmente proceder a una agregación media de los valores para la que se probaron diferentes alternativas de ponderación en base al criterio experto del grupo de investigación, así como a la consulta de referencias especializadas (CEPAL, 2009; Beccari, 2016; EEA, 2018; MITECO, 2023). En el caso de la peligrosidad, también se procedió a estandarizar las dos variables empleadas (días Tmax > 40º y días olas calor), al objeto de expresar ambos componentes, peligrosidad (P) y vulnerabilidad (V), en la misma escala de valores y, finalmente, obtener en esta misma escala los niveles de riesgo ($R = P * V$); a efecto de representación cartográfica los niveles de vulnerabilidad y riesgo se clasifican en 5 clases según la técnica de los cuantiles.

Una vez disponibles las variables y los indicadores extraídos a partir de ellas, se han generado una serie de clientes web ligeros en un entorno cloud (geovisor, widgets y dashboard), de forma que se garantiza la geovisualización, exploración y análisis de los datos con una alta eficacia y flexibilidad. Para la generación de estas herramientas se ha integrado la base datos de variables e indicadores en la plataforma de CARTO, en la que mediante el módulo “Builder” se incorporan diferentes utilidades para la exploración interactiva y el análisis de los datos.

3. RESULTADOS

Más que una relación de resultados concretos, en este apartado se muestran ejemplos de la explotación de las herramientas generadas que, como se ha comentado, permiten una gran flexibilidad de uso y la extracción de numerosa información de síntesis.

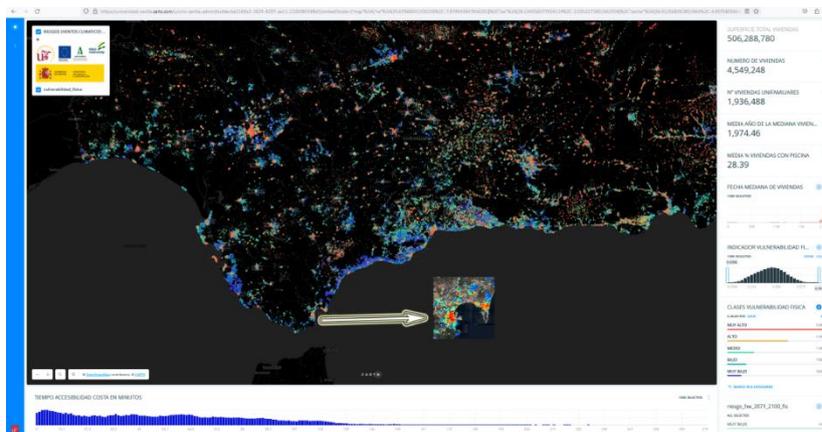


Figura 1. Espacialización de la vulnerabilidad física en el cliente web1

Así, en la figura 1 se muestra la espacialización de las clases de vulnerabilidad física, utilizándose para

ello el cliente web (geovisor y dashboard) generado, del que se facilita enlace, además de una tabla (Tabla 1), con las variables que permite consultar (incluye también las variables de vulnerabilidad social). En este caso, se puede apreciar la clara influencia de la accesibilidad a la costa como variable de peso para una menor vulnerabilidad, si bien, otras variables como la alta densidad edificatoria (ciudad de Cádiz), o la presencia de enclaves industriales (Bahía de Algeciras, Huelva), contribuyen a niveles altos de vulnerabilidad física pese a la proximidad a la costa. En el entorno de estas aglomeraciones urbanas, sin embargo, como ocurre tanto en el litoral (Bahía de Algeciras, entorno de Málaga), como en interior (áreas metropolitanas de Sevilla o Córdoba), la presencia de urbanizaciones con predominio de viviendas unifamiliares y presencia de piscinas y espacios verdes crea orlas de menor vulnerabilidad física.

Tabla 1 Variables representadas en los clientes web1 y 2

	VULNERABILIDAD FÍSICA clientes web1	VULNERABILIDAD SOCIAL clientes web2
Widgets de fórmula (valores agregados): se recalculan en función del área de visualización y la elección de filtros con widgets de histograma o categóricos:	Superficie edificada	Población total (redondeo)
	Superficie total de viviendas	Población femenina (redondeo)
	Número de viviendas	Población masculina (redondeo)
	Número de viviendas unifamiliares	Población igual o superior a 65 años (redondeo)
	Media de la mediana del año de construcción de las viviendas	Población inferior o igual a 15 años (redondeo)
	Media del porcentaje de viviendas con piscina	Población extranjera (redondeo)
Widgets categóricos: filtran y seleccionan por intervalos de tiempo y distancia al punto más cercano de la costa	Clases de vulnerabilidad física	Clases de vulnerabilidad social
	Riesgo físico ola calor (escenario SPP585; período 2071-2100)	Riesgo social ola calor (escenario SPP585; período 2071-2100)
	Riesgo físico ola calor (escenario SPP585; período 1985-2013)	Riesgo social ola calor (escenario SPP585; período 1985-2013)
	Riesgo físico T > 40°C (escenario SPP585; período 2071-2100)	Riesgo social T > 40°C (escenario SPP585; período 2071-2100)
	Riesgo físico T > 40°C (escenario SPP585; período 1985-2013)	Riesgo social T > 40°C (escenario SPP585; período 1985-2013)
	Rejillas con población	Rejillas con población
Widgets categóricos: filtran y seleccionan espacialmente el área de análisis por:	Provincia	Provincia
	Municipio	Municipio
Widgets de histograma: filtran y seleccionan por el valor de las variables:	Fecha mediana de construcción de las viviendas	Renta media neta por persona
	Indicador de vulnerabilidad física	Indicador de vulnerabilidad social
	Número de días consecutivos ola calor (escenario SPP585; período 1985-2013)	Número de días consecutivos ola calor (escenario SPP585; período 1985-2013)
	Número de días consecutivos ola calor (escenario SPP585; período 2071-2100)	Número de días consecutivos ola calor (escenario SPP585; período 2071-2100)
	Número de días consecutivos con más de 40°C (escenario SPP585; período 1985-2013)	Número de días consecutivos con más de 40°C (escenario SPP585; período 1985-2013)
	Número de días consecutivos con más de 40°C (escenario SPP585; período 2071-2100)	Número de días consecutivos con más de 40°C (escenario SPP585; período 2071-2100)

	Tiempo de acceso a la costa	Tiempo de acceso a la costa
Enlaces a clientes web	https://universidad-sevilla.carto.com/u/univ-sevilla-admin/builder/ee2168a3-3829-4297-ae11-2106980388d3/embed	https://universidad-sevilla-admin/builder/7f3c40df-5861-480b-bb4d-772723a15465/embed

En cuanto a la espacialización del riesgo, en la figura 2 se representa el que correspondería a la consideración conjunta de la vulnerabilidad física (V) y la estimación del número anual de días con temperatura superior a 40º para el periodo 2071-2100 (P). Es evidente que en este caso la proximidad a la costa incrementa su influencia, al haberse considerado tanto en la modelización climática, y como en su vertiente reductora de la vulnerabilidad. De esta forma, si se atiende también al gráfico de la figura 3, puede observarse el comportamiento diferencial que ofrecen las provincias. Así, Almería, Cádiz y Málaga, se presentan como provincias costeras, en las que la mayor parte del parque inmobiliario se encuentra en la zona litoral, incluidas la capital provincial y, por tanto, superan el 60% de las teselas clasificadas con riesgo bajo o muy bajo. En un sentido opuesto, Córdoba y Jaén, y en menor medida Sevilla, se presentan como provincias interiores, en las que el riesgo alto o muy alto es claramente dominante. Por último, Huelva y Granada se presentan como casos intermedios, con una fachada costera menos urbanizada en el caso de Huelva, sobre todo en su parte oriental (Doñana), y con una menor longitud de costa y una capital interior en el caso de Granada.

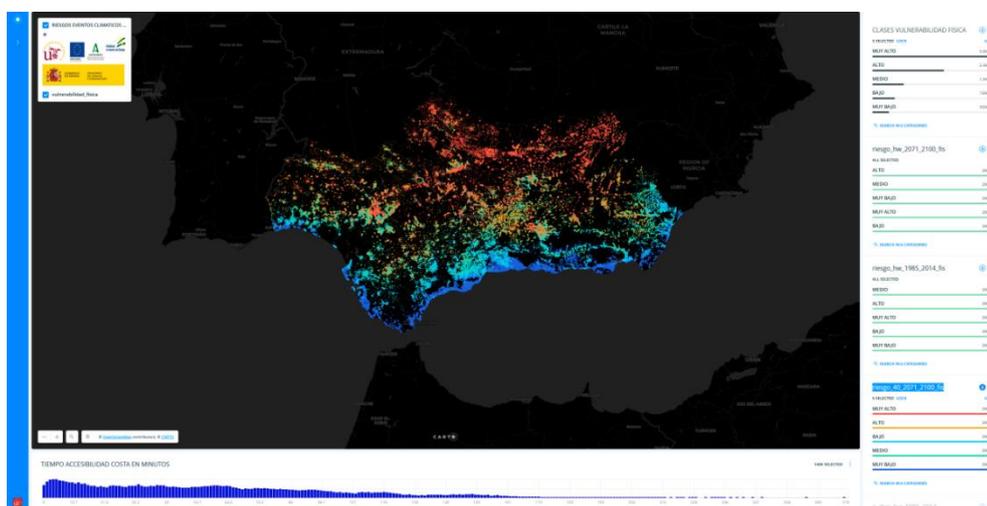


Figura 2. Espacialización del riesgo por temperaturas altas (días anuales $T > 40^\circ$ y vulnerabilidad física) en el cliente web1

En el caso de la vulnerabilidad social (figura 4), se han pretendido identificar dos grupos de situaciones que se vinculan a una mayor susceptibilidad frente a la incidencia de episodios de temperaturas extremas. Así, de una parte, la coincidencia de características demográficas y económicas negativas se refleja de forma muy clara en la delimitación de barrios marginales en el entorno de las grandes ciudades, como ocurre en el caso de Sevilla, donde se aprecia la alta vulnerabilidad de los sectores urbanos desde el sureste al noreste de la ciudad. De otra parte, frente a estas altas concentraciones de población vulnerable, se detectan teselas en ámbitos rurales o naturales, donde variables como la escasez de población o el porcentaje de población envejecida o dependiente hace que este indicador de vulnerabilidad social también ofrezca niveles altos.

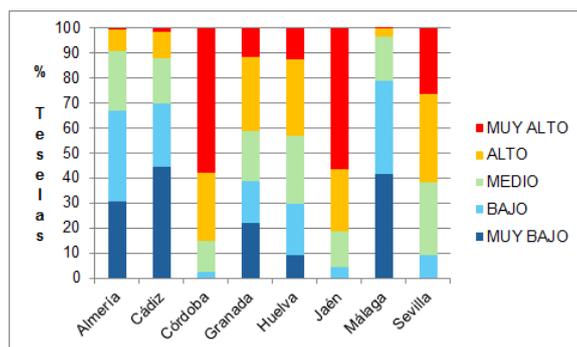


Figura 3. Distribución porcentual de los niveles de riesgo (figura 3) por provincias

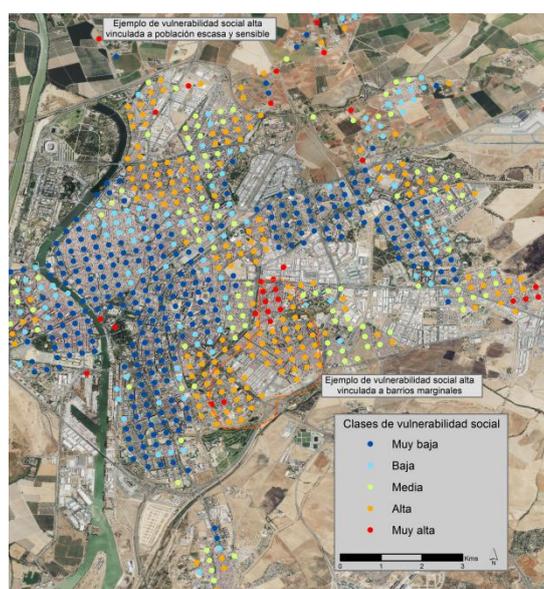


Figura 4. Espacialización de la vulnerabilidad social en el entorno de Sevilla

4. CONCLUSIONES

Los diferentes ejemplos de resultados obtenidos permiten concluir en el indudable interés de las dos aproximaciones fundamentales que se han mostrado en este trabajo. (i) De una parte, la integración de datos procedentes de múltiples fuentes de información, formatos y ámbitos temáticos, sobre la base de una misma unidad espacial de referencia (GRID250), se considera como una aproximación muy conveniente para la generación de indicadores de vulnerabilidad frente a fenómenos naturales de tipo extremo. En este sentido, se atienden esencialmente a dos problemas. Por un lado, desde la óptica conceptual, pueden abordarse componentes diferentes de la vulnerabilidad (física, social), dado el número y variedad de la información manejada, y, por otro lado, se consigue un detalle espacial que supera el que habitualmente se maneja en los estudios de vulnerabilidad (unidades administrativas), acercándose apreciablemente a las escalas propias de los estudios de peligrosidad. (ii) De otra parte, el desarrollo de los clientes web que se muestran, permiten vislumbrar un tipo de herramienta de gran interés tanto desde la óptica académica en los estudios sobre riesgos naturales, como para su utilización por parte de gestores, agentes económicos y ciudadanía, en este caso concreto de cara a una mejor comprensión de los efectos potenciales del cambio climático, sobre todo en lo relativo a la incidencia de los episodios de temperaturas alta extremas.

Como líneas de acción futura, se persigue la ampliación de los análisis en varios frentes fundamentales. Por un lado, se pretende enriquecer las dimensiones de la vulnerabilidad estudiadas (física y social), e incorporar otras dimensiones nuevas como pueden ser la capacidad de gestión (coping capacity), para lo que puede ser imprescindible la extensión de los análisis de accesibilidad a aspectos como el aislamiento territorial o el acceso a servicios y dotaciones esenciales. Por otro lado, deben aumentarse los fenómenos naturales a estudiar (inundaciones, peligrosidad sísmica...), de forma que se adapten los criterios de delimitación de las

respectivas vulnerabilidades específicas y se amplíe el catálogo de riesgos. Por último, es necesario incorporar algunos criterios de validación (información de Protección Civil, Consorcio de Compensación de Seguros...), que permitan garantizar cierta fiabilidad de los resultados que se obtienen.

AGRADECIMIENTOS

Parte de los resultados de este trabajo se realizaron en el contexto de los siguientes proyectos: “Infraestructuras científicas para la vigilancia y adaptación al cambio global en Andalucía” (INDALO_Lifewatch) y PID2019-106834RB-I00 (RiskMACLOUD) Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades; P18-FR-2574 (CLOUDRISK_A) Junta de Andalucía (Consejería de Economía y Conocimiento).

5. BIBLIOGRAFÍA

- Beccari, B. (2016). A Comparative Analysis of Disaster Risk, Vulnerability and Resilience Composite Indicators. *PLoS Curr.* 10.1371/currents.dis.19f9c194f3e3724d9ffa285b157c6ee3.
- Biswas, S. y Nautyal, S. (2023). A review of socio-economic vulnerability: The emergence of its theoretical concepts, models and methodologies *Natural Hazards Research*, 3 (1), 563-571. <https://doi.org/10.1016/j.nhres.2023.05.005>.
- CEPAL (2009). Guía metodológica Diseño de indicadores compuestos de desarrollo sostenible. Naciones Unidas. Santiago de Chile.
- Cutter, S. y Finch, C. (2008). Temporal and spatial changes in social vulnerability to natural hazards. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 105 (7), 2301-2306. 10.1073/pnas.0710375105
- EEA (2018). Unequal exposure and unequal impacts: social vulnerability to air pollution, noise and extreme temperatures in Europe. European Union. Luxembourg.
- Gayen, S. (2023): Definition and mapping of indicators of vulnerability to natural disasters. Tesis doctoral. Universidad de Sevilla. <https://hdl.handle.net/11441/155409>
- MITECO (2023). Guía para la evaluación de riesgos asociados al cambio climático 2023. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Madrid.
- Noguero-Hernández, M.D., Vallejo-Villalta, I., Ramírez-Moreno, E., Ramírez-Torres, A. (2016): Identificación del espacio residencial en Andalucía a partir de datos catastrales. En Aplicaciones de las Tecnologías de la Información Geográfica (TIG) para el desarrollo económico sostenible. XVII Congreso Nacional de Tecnologías de Información Geográfica, Málaga. pp. 421-430.
- Olcina, J. (2008). Cambios en la consideración territorial, conceptual y de método de los riesgos naturales. *Scripta Nova: revista electrónica de geografía y ciencias sociales*, 12, <https://raco.cat/index.php/Scripta-Nova/article/view/114794>.

Indicadores locales de autocorrelación espacial aplicados al análisis del proceso de regularización del alquiler turístico en Mallorca

A. Pons Esteva¹

¹Departamento de Geografía, Universitat de les Illes Balears. Cra de Valldemossa Km 7,5, 07122 Palma (Illes Balears)

antoni.pons@uib.cat, <https://orcid.org/0000-0003-0827-499X>

RESUMEN: Mallorca es uno de los principales destinos turísticos del mediterráneo y ha experimentado un fuerte crecimiento del alquiler turístico en la última década. El gobierno autonómico aprobó en 2017 una ley para hacer frente al problema de falta de regularización que planteaba la nueva modalidad, en la cual se fijó la posibilidad de comercializar tanto viviendas unifamiliares, ya permitidas en ese momento, como plurifamiliares. El presente trabajo propone el uso de técnicas de *clustering* espacial para analizar los patrones de distribución del proceso de regularización de la oferta de alojamientos de alquiler turístico, entre los años 2016 y 2022. Se realizó un análisis de la serie temporal de altas del registro oficial de la Comunidad Autónoma y se aplicaron indicadores locales de autocorrelación espacial a los datos disponibles de los periodos anterior y posterior a la aprobación de la ley. Las herramientas utilizadas han permitido mejorar la interpretación del proceso, ya que han aportado información sobre los valores más significativos desde el punto de vista estadístico y espacial. En el periodo anterior a la aprobación de la ley se experimentó un incremento de las altas, mientras que en los años posteriores se produjo una ralentización. El principal foco de la regularización durante los dos periodos se dio en torno a las Bahías de Pollença y Alcúdia, en el noreste de la isla. Las altas en viviendas plurifamiliares explicaron, en gran medida, el proceso en los años posteriores a la aprobación de la ley, y los municipios con un menor volumen de viviendas plurifamiliares o aquellos en los que se prohibió la modalidad, como Palma, fueron los que presentaron unos valores de regularización más bajos.

Palabras-clave: alquiler turístico, *clustering* espacial, indicadores locales de autocorrelación espacial, Mallorca.

1. INTRODUCCIÓN

Las viviendas de uso turístico comercializadas a través de plataformas digitales han adquirido un especial protagonismo a nivel mundial en la última década (Arana E. , 2018). Este fenómeno ha supuesto un incremento notable de las plazas de alojamiento y ha comportado problemáticas que las administraciones han tenido que afrontar mediante normas e instrumentos de ordenación (Nieuwland & Melik, 2018).

Numerosos trabajos académicos han enfatizado el papel del geógrafo en el campo de la ordenación territorial y el planeamiento urbanístico, utilizando técnicas de análisis espacial en entornos SIG para monitorizar y hacer seguimiento de la políticas territoriales y turísticas (Segura & Pedregal, 2011; Perkins, Larsen, & Brown, 2009). Entre esas técnicas, cada vez es más común el uso de la estadística espacial para estudiar procesos territoriales. La dependencia basada en la distancia y en la posición de los elementos estudiados puede modelizarse de distintas maneras utilizando las herramientas proporcionadas por la estadística espacial (Gómez-Rubio, 2022).

El uso de estas herramientas en entornos SIG ha supuesto una mejora de la capacidad de diagnóstico aplicada a diferentes campos, como en el análisis de políticas y en la toma de decisiones (Sarrión-Gavilán, Benítez-Márquez, & Mora-Rangel, 2015). En ese sentido, es cada vez más utilizado el análisis exploratorio de datos espaciales (ESDA en sus siglas en inglés). El ESDA se puede definir como una colección de técnicas que tienen como objetivo describir y visualizar distribuciones espaciales, identificar localizaciones atípicas, descubrir patrones de distribución espacial, etc. Estas herramientas son útiles cuando no hay signos claros presentes en los patrones de distribución de una o diversas variables (Rodríguez Rangel & Sánchez Rivero, 2020).

Las técnicas de *clustering* constituyen uno de los principales métodos de análisis exploratorio en la estadística espacial, son muy usados y su objetivo es identificar las ubicaciones espacialmente significativas de puntos calientes y fríos, valores atípicos, así como agrupar entidades o zonas similares (Karagöz, Aktaş, & Kantar, 2022). Se aplican técnicas como los indicadores locales de autocorrelación espacial (I Anselin Local

de Moran) o el análisis de puntos calientes (basado en G_i^* de Getis-Ord), en las cuales se identifican agrupaciones espaciales de las entidades para una determinada variable (Sánchez-Martín, Rengifo-Gallego, & Blas-Morato, 2019). Mientras que el test G_i^* de Getis-Ord focaliza su análisis en localizar agrupaciones de valores altos y bajos, la herramienta de I Anselin Local de Moran identifica además valores anómalos en comparación con las localizaciones vecinas (Rodríguez Rangel & Sánchez Rivero, 2020; Anselin, 1995).

Las técnicas mencionadas se han aplicado en diferentes tipos de estudios territoriales y turísticos: para caracterizar los flujos de turismo y sus impactos (Sarrión-Gavilán, Benítez-Márquez, & Mora-Rangel, 2015), para analizar los patrones de distribución de viviendas turísticas o para profundizar en el conocimiento de las políticas públicas de ordenación (Domènech & Zoğal, 2020). Pero la principal aportación de estos estudios no es sólo usar técnicas de agrupación para encontrar patrones espaciales previamente desconocidos, sino para poder aplicar ese conocimiento en la planificación (Sánchez-Martín, Rengifo-Gallego, & Blas-Morato, 2019; Rodríguez Rangel & Sánchez Rivero, 2020).

La escala urbana, a la que se trabaja en la mayoría de esos estudios, simplifica el análisis porque cubre un área reducida. En cambio, las investigaciones que tratan dichos temas a una escala regional tienen que afrontar situaciones más problemáticas, ya que dentro del ámbito de estudio se integra una mayor variedad de casos específicos que dificultan la implementación de los modelos (Sánchez-Martín, Rengifo-Gallego, & Blas-Morato, 2019).

La isla de Mallorca constituye un ámbito regional que ha experimentado un fuerte crecimiento del alquiler turístico en la última década. En el año 2016, en la fase de diagnóstico del Plan Integral de Ámbitos Turísticos (PIAT) se estimaron en 20.000 las viviendas que se comercializaban para estancias turísticas, lo que suponía una cifra aproximada de 123.700 plazas. Uno de los problemas asociados a la proliferación de las viviendas turísticas en el 2016 estribaba en el enorme peso de la oferta no reglada que representaba el 53% del total (Pons & Pons, 2019). En ese momento, y según la legislación vigente, sólo podían darse de alta viviendas turísticas unifamiliares en el registro autonómico. Con la finalidad de dar solución a los problemas derivados de la expansión de la nueva modalidad de alojamiento turístico, el gobierno autonómico impulsó y aprobó la Ley 6/2017, de 31 de julio, de modificación de la Ley 8/2012, de 19 de julio, del turismo de las Islas Baleares, relativa a la comercialización de estancias turísticas en viviendas (ETV)³. La nueva ley fijó la posibilidad de comercializar tanto viviendas unifamiliares como plurifamiliares, distinguiendo entre aquellas viviendas principales que sólo podían comercializarse durante 60 días al año y las no principales que podían ser objeto de comercialización todo el año. Además, emplazó a los Consells Insulars para que establecieran un límite máximo de plazas de alquiler turístico en cada una de las islas.

En este contexto, el presente trabajo propone el uso de técnicas de *clustering* espacial para analizar los patrones de distribución del proceso de regularización de la oferta de alojamientos de alquiler turístico en la isla de Mallorca, entre los años 2016 y 2022. ¿Permiten los indicadores locales de autocorrelación espacial identificar patrones que ayuden a comprender las dinámicas espaciales en el proceso de regularización? ¿Existen diferencias de comportamiento espacial en las altas de viviendas turísticas entre el periodo anterior a la aprobación de la Ley 6/2017 (2016-2017) y el periodo posterior (2018-2022)? ¿Cuál ha sido el papel de las viviendas plurifamiliares en ese proceso?

2. METODOLOGÍA

El área de estudio del trabajo es Mallorca, la mayor de las islas del archipiélago Balear, con una extensión de 3.640 Km². Situada en el mediterráneo occidental, dispone de una economía dependiente en gran medida del turismo y con un peso importante de las viviendas de uso turístico (Figura 1).

Para llevar a cabo la investigación se ha realizado un análisis de la serie temporal de altas en el Catálogo abierto de datos de las islas Baleares⁴, entre los años 2016 y 2022. Se trata del registro oficial de la Comunidad Autónoma y contiene información sobre todas las viviendas comercializadas legalmente en la isla: fecha de

³ BOIB núm. 93 Ext, de 31 de julio 2017. https://intranet.caib.es/sites/institutestudisautonomics/ca/n/Ilei_7-2017_0/

⁴ <https://catalegdades.caib.cat/dataset/Mapa-Habitatges-tur-stics-Mallorca/c9bx-ar33>

alta de la actividad, dirección, coordenadas (sólo en algunos casos), plazas... Al no disponer de todos los alojamientos geolocalizados, los datos tuvieron que ser trabajados por municipios con la finalidad de estudiar su distribución territorial.

En primer lugar, se representaron cartográficamente los datos de altas de viviendas turísticas para dos periodos. El primero corresponde a los años 2016 y 2017, hasta el 31 de julio, con el fin de identificar los patrones espaciales y las características del proceso regularización de viviendas unifamiliares antes de la aprobación de la ley 6/2017. A partir de la aprobación de la ley se estableció una moratoria de 1 año, en el cual no se registraron altas. El segundo periodo analizado abarca desde julio de 2018 hasta junio de 2022 cuando se aprobó la Ley 3/2022⁵ que suspendía la posibilidad de dar de alta nuevas plazas turísticas.

En segundo lugar, se aplicaron indicadores locales de autocorrelación espacial a los datos de altas disponibles de cada uno de los dos periodos y a los correspondientes a la modalidad plurifamiliar en el periodo 2018-2022. Concretamente se utilizó la técnica de análisis de clúster y de valor atípico (I Anselin Local de Moran) con ArcGIS Pro 3.1. Esta técnica permite tanto la detección de agrupaciones como de anomalías lo que la hace más completa que la técnica de puntos calientes (Sánchez-Martín, Rengifo-Gallego, & Blas-Morato, 2019; Sarrión-Gavilán, Benítez-Márquez, & Mora-Rangel, 2015). La herramienta clasifica las entidades de entrada en 4 diferentes agrupaciones: HH (entidad espacial con un valor alto rodeada de otras también con valores altos), LH (entidad con un valor bajo rodeada de otras con valores altos), LL (entidad con un valor bajo rodeada de otras también con valores bajos) y HL (entidad con valor alto rodeada de otras con valores bajos). Para ejecutar la técnica se utilizó el parámetro de distancia inversa para conceptualizar las relaciones espaciales y el valor predeterminado de 499 permutaciones.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

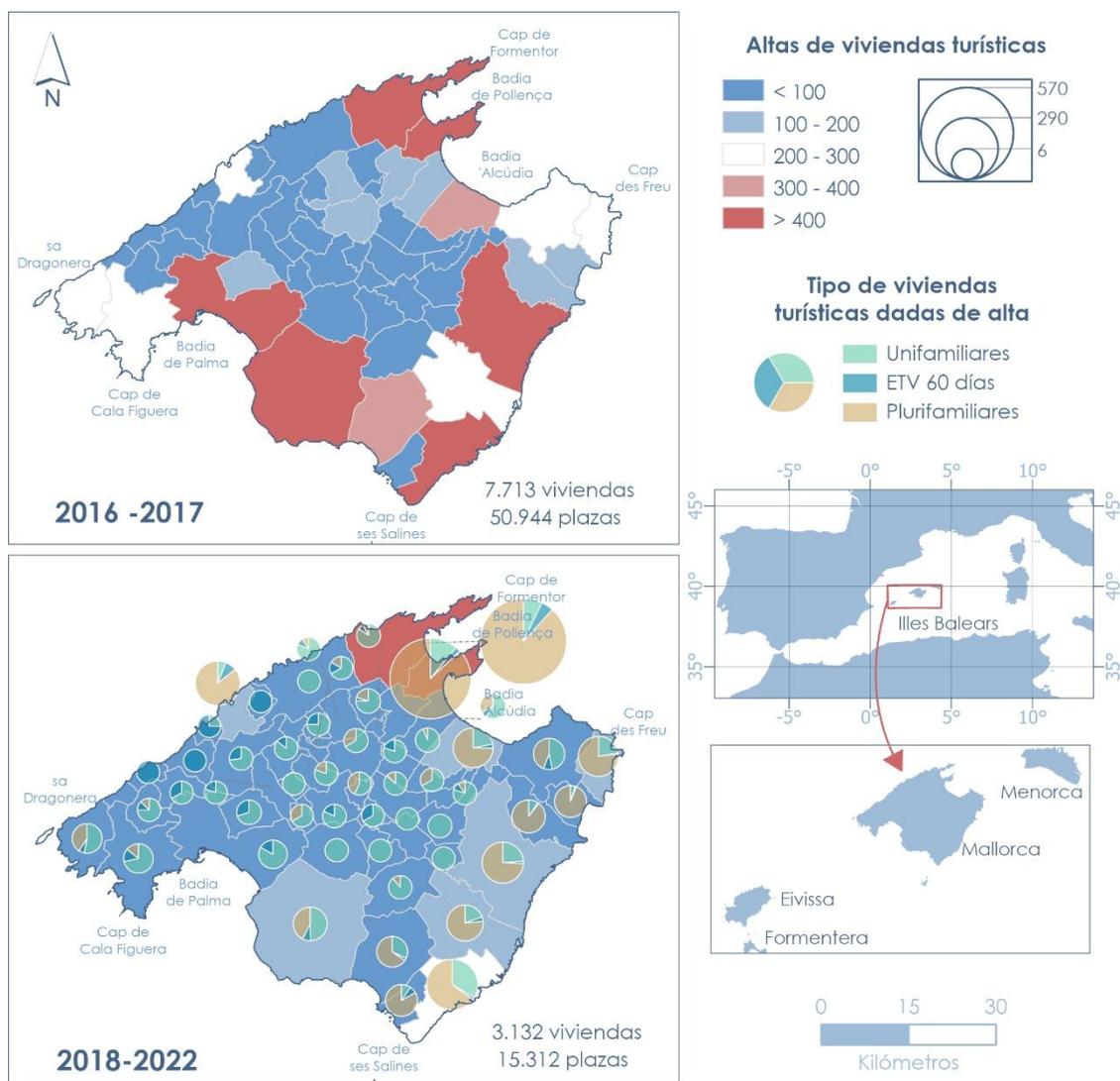
Desde el inicio del año 2016 y hasta la fecha de aprobación de la ley 6/2017 se dieron de alta 7.713 viviendas turísticas unifamiliares (50.944 plazas) en el registro autonómico. Cifras muy elevadas que confirman que la regularización de la oferta se produjo, en gran medida, antes de la aprobación de la ley, como consecuencia de un “efecto llamada” que alentó a los arrendadores de viviendas unifamiliares a dar de alta sus alojamientos antes de la aprobación, y evitar de esa manera los nuevos requisitos que se pudieran establecer. En esos años el fenómeno se circunscribía en los municipios turísticos costeros (Figura 1). Sin embargo, si analizamos los resultados obtenidos en el análisis de clúster y de valor atípico (Figura 2), sólo dos municipios quedan adscritos al clúster Alto-Alto (HH), lo que implica un número significativamente elevado de altas (588 altas en Pollença y 494 altas en Alcúdia) y que a su vez están rodeados por municipios con valores altos. El interior de la isla por otro lado queda adscrito al clúster Bajo-Bajo (LL), lo que supone un menor peso del fenómeno en esa área, con una media de 66,2 altas por municipio. También destaca el caso atípico del municipio de Ses Salines en el sur de la isla, por ser un municipio costero turístico que registra un volumen significativamente bajo de altas (85) y que a su vez se encuentra rodeado por municipios con valores más elevados. El diagrama de dispersión asociado al modelo facilita y completa la interpretación de los resultados, ya que permite identificar claramente las características de las entidades incluidas en cada agrupación. En resumen, el análisis nos proporciona una información adicional sobre las altas por municipios que mejora la interpretación, aspecto que también se destaca en otros estudios similares (Sarrión-Gavilán, Benítez-Márquez, & Mora-Rangel, 2015).

El periodo 2018-2022 muestra un panorama diferente, con una reducción importante de las altas en la mayoría de municipios de Mallorca, en esos 5 años se dieron de alta 3.132 viviendas y 15.312 plazas (Figura 1). Según los datos analizados, se redujo el número de plazas por vivienda aspecto que puede explicarse porque se dieron de alta viviendas en edificios plurifamiliares, que son más pequeñas y disponen de un menor número de plazas. Mientras tanto, el análisis clúster y de valor atípico vuelve a centrar el peso del fenómeno en los municipios de las bahías del norte de la isla (HH), ahora si cabe con mayor incidencia, como se desprende del diagrama de dispersión. La identificación de un patrón de autocorrelación espacial positiva en

⁵ Boib nº 79, de 18 de junio de 2022. https://www.caib.es/sites/institutestudisautonemics/ca/n/decret_llei_32022_d11_de_febrer_de_mesures_urgents_per_a_la_sostenibilitat_i_la_circularitat_del_turisme_de_les_illes_balears/

una región determinada indica la existencia de un efecto contagio entre los destinos vecinos que haría necesaria la toma de una estrategia de ordenación común (Rodríguez Rangel & Sánchez Rivero, 2020). En este periodo destaca el valor atípico Alto-Bajo (HL) del municipio de Sóller en la costa norte de la isla, que presenta valores moderadamente altos, aunque lejos de los valores de Pollença y Alcúdia, y que se encuentra rodeado por municipios con valores bajos. Por su lado, el interior de la isla continúa presentando valores Bajo-Bajo (LL), incluso más acusados que en el periodo 2016-2017.

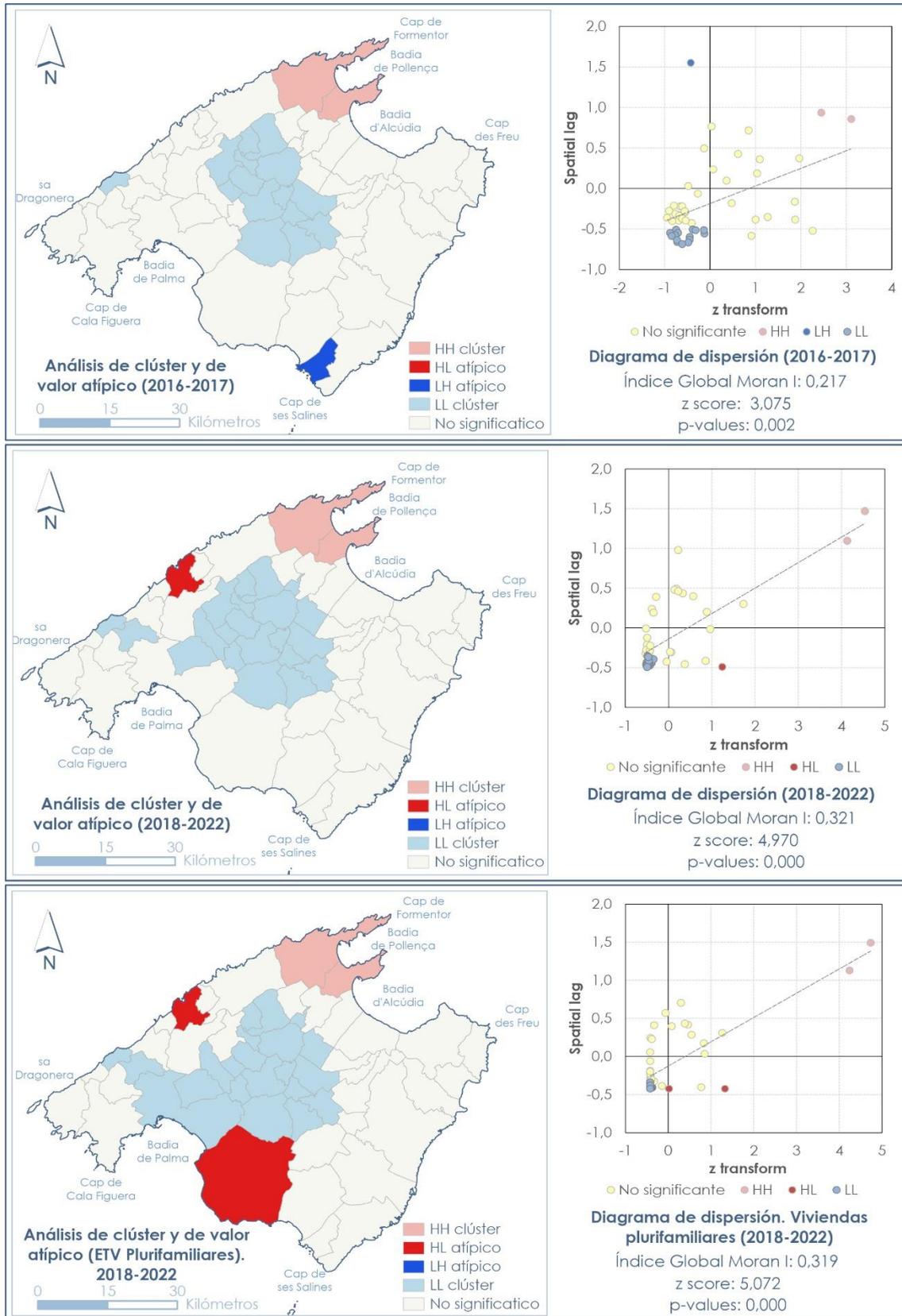
Figura 16. Altas de viviendas turísticas por municipios en Mallorca. Elaboración propia a partir del Catálogo abierto de datos de las islas Baleares.



En cuanto a la tipología de las viviendas regularizadas en el periodo 2018-2022, se puede observar cómo los municipios costeros turísticos de la costa este de la isla presentaban una mayor proporción de altas en viviendas plurifamiliares, mientras que en el resto de la isla continuaban dominando las unifamiliares, aunque con volúmenes claramente inferiores (Figura 1). El análisis de clúster y de valor atípico aplicado a las altas de viviendas plurifamiliares tiene un comportamiento casi idéntico al obtenido en el análisis del total de altas del mismo periodo. El cálculo del coeficiente de correlación de Pearson a partir de los valores z transformados de las dos variables arroja un resultado de 0,99, lo que confirmaría que las altas en viviendas plurifamiliares explican el proceso de regularización del periodo posterior a la aprobación de la Ley 6/2017. Alcúdia (453 altas) y Pollença (501 altas) son los dos municipios que quedan incluidos en el clúster Alto-Alto (HH) de viviendas turísticas plurifamiliares. Se detectan dos valores atípicos Alto-Bajo (HL), pero con valores muy alejados de los dos anteriores: Sóller (170 altas), que ya se identificaba en el anterior análisis, y Llucmajor (43 altas), al sur de la bahía de Palma. Los municipios del centro de la isla se adscriben al clúster Bajo-Bajo (LL), ya que en esos municipios dominan las viviendas unifamiliares. Palma también queda en ese grupo, lo que se explica porque el Ayuntamiento aprobó una normativa que prohibía la comercialización de viviendas

plurifamiliares.

Figura 2. Técnicas de clustering aplicadas a las altas de viviendas turísticas por municipios en Mallorca. Elaboración propia a partir del Catálogo abierto de datos de las islas Baleares.



4. CONCLUSIONES

La aplicación de indicadores locales de autocorrelación espacial ha contribuido a mejorar la interpretación del proceso de regularización de viviendas turísticas en Mallorca, ya que ha aportado información sobre los valores más significativos desde el punto de vista estadístico y espacial. Se identifican diferencias en cuanto al volumen de viviendas regularizadas entre el periodo anterior a la aprobación de la Ley 6/2017, con valores muy altos de regularización, y los años posteriores (2018-2022), con un descenso importante. Sin embargo, los patrones espaciales de distribución de las altas son muy similares en los dos periodos. El principal foco de regularización de viviendas turísticas de la isla se encuentra en torno a las Bahías de Pollença y Alcúdia en el noreste. Las altas en viviendas plurifamiliares explican en gran medida el proceso en los años posteriores a la aprobación de la ley, y los municipios con un escaso peso de las viviendas plurifamiliares o aquellos en los que se prohibió la modalidad, como Palma, son los que presentan unos valores de regularización más bajos. Los trabajos constituyen la primera etapa de un análisis más profundo a realizar en el futuro, que deberá abordar aspectos como la estimación del porcentaje de viviendas regularizadas sobre el total del parque o las causas y consecuencias de los patrones espaciales detectados.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Anselin, L. (1995). Local Indicators of Spatial Association—LISA. *Geographical Analysis*, 27(2), 93-184. doi:<https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1995.tb00338.x>
- Arana, E. (2018). La intervención local en la viviendas de uso turístico a través de la zonificación urbanística: requisitos y consecuencias. *Revista de estudios de la administración local i autonómica*, 10, 6-21. doi:<https://doi.org/10.24965/reala.v0i10.10545>
- Domènech, A., & Zoğal, V. (2020). Geographical dimensions of airbnb in mountain areas: The case of Andorra. *Journal of Rural Studies*, 72, 361-372. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2020.08.051>
- Gómez-Rubio, V. (2022). Una introducción a la estadística espacial. *BEIO*, 38(1).
- Karagöz, D., Aktaş, S., & Kantar, Y. (2022). Spatial analysis of the relationship between tourist attractions and tourist flows in Turkey. *European Journal of Tourism Research*, 31. doi:<https://doi.org/10.54055/ejtr.v31i.2745>
- Nieuwland, S., & Melik, R. (2018). Regulating Airbnb: how cities deal with perceived negative externalities of short-term rentals. *Current Issues in Tourism*, 23(7), 811-825. doi:<http://dx.doi.org/10.1080/13683500.2018.1504899>
- Perkins, D., Larsen, C., & Brown, B. (2009). Mapping Urban Revitalization: Using GIS Spatial Analysis to Evaluate a New Housing Policy. *Journal of Prevention & Intervention in the Community*, 37(1), 48-65. doi:[10.1080/10852350802498698](https://doi.org/10.1080/10852350802498698)
- Pons, A., & Pons, M. (2019). El uso de criterios geográficos en la ordenación de estancias turísticas en viviendas. La experiencia de la zonificación en Mallorca. En J. c. Farinós, J. Escribano, M. Peñarubia, J. Serrano, & S. e. Asins, *Desafíos y oportunidades de un mundo en transición: una interpretación desde la Geografía* (págs. 663-675). Valencia: Universitat de València.
- Rodríguez Rangel, M., & Sánchez Rivero, M. (2020). Spatial Imbalance Between Tourist Supply and Demand: The Identification of Spatial Clusters in Extremadura, Spain. *Sustainability*, 12(4). doi:<https://doi.org/10.3390/su12041651>
- Sánchez-Martín, J., Rengifo-Gallego, J., & Blas-Morato, R. (2019). Hot Spot Analysis versus Cluster and Outlier Analysis: An Enquiry into the Grouping of Rural Accommodation in Extremadura (Spain). *ISPRS Int. J. Geo-Inf*, 8(4), 176. doi:<https://doi.org/10.3390/ijgi8040176>
- Sarrión-Gavilán, M., Benítez-Márquez, M., & Mora-Rangel, E. (2015). Spatial distribution of tourism supply in Andalusia. *Tourism Management Perspectives*, 15, 29-45. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tmp.2015.03.008>
- Sarrión-Gavilán, M., Benítez-Márquez, M., & Mora-Rangel, E. (2015). Spatial distribution of tourism supply in Andalusia. *Tourism Management Perspectives*, 15, 29-45. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tmp.2015.03.008>
- Segura, S., & Pedregal, B. (2011). Indicadores de seguimiento y control en planes de ordenación del territorio. En V. y. González, *Urbanismo expansivo de la utopía a la realidad. XXII Congreso de Geógrafos Españoles* (págs. 691-702). Alicante: Universidad de Alicante.

Estimación de modelos de combustible con tecnología LiDAR en ambientes mediterráneos

M.T. Lamelas^{1,2}, R. Hoffrén^{1,2}, J. de la Riva^{1,2}, D. Domingo^{2,4}, A.L. Montealegre^{2,3}, A. García-Martín^{2,3}

¹ Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio, Universidad de Zaragoza. C. Pedro Cerbuna 12, 50009 Zaragoza (Aragón).

² Grupo GEOFOREST, Instituto Universitario de Ciencias Ambientales de Aragón (IUCA), Universidad de Zaragoza, C. Pedro Cerbuna 12, 50009 Zaragoza (Aragón).

³ Centro Universitario de la Defensa de Zaragoza, Academia General Militar. Crta. de Huesca s/n, 50009 Zaragoza (Aragón).

⁴ EiFAB-iuFOR, Universidad de Valladolid, Campus Duques de Soria, Soria (Castilla y León).

tlamelas@unizar.es, <https://orcid.org/0000-0002-8954-7517>

rhoffren@unizar.es, <https://orcid.org/0000-0002-9123-304X>

delariva@unizar.es, <https://orcid.org/0000-0003-2615-270X>

dario.domingo@uva.es, <https://orcid.org/0000-0002-8362-7559>

monteale@unizar.es, <https://orcid.org/0000-0001-6288-2780>

alqarcia@unizar.es, <https://orcid.org/0000-0003-2610-7749>

RESUMEN: Un preciso conocimiento de los tipos de combustible es fundamental en el contexto de la gestión del fuego forestal, máxime en un escenario de agravamiento de la problemática de los incendios. Los tipos de combustible constituyen clases de vegetación con un comportamiento similar frente al fuego, por lo que estimar sus características es esencial en relación con la propagación del fuego. Diferentes técnicas de teledetección se han utilizado con relativo éxito en la extrapolación espacial de la información puntual obtenida en campo, destacando el uso de sensores LiDAR. Todo ello ha motivado una línea de trabajo en el grupo de investigación GEOFOREST, centrando la actividad en los paisajes forestales mediterráneos y en la utilización de datos LiDAR obtenidos por una diversidad de plataformas que incluye registros satelitales (SLS GEDI), aeroportados (ALS PNOA), capturados con UAV (Matrice 300 RTK) y sistemas terrestres móviles (HMLS, GeoSLAM). Se han utilizado técnicas diversas, desde modelos empíricos paramétricos como la clasificación digital supervisada, modelos estadísticos no paramétricos y modelos físicos basados en modelos de transferencia radiactiva (DART). El objeto de este trabajo es presentar sintéticamente los resultados de una década de investigación y hacer balance de las potencialidades y limitaciones operativas de estas aproximaciones. Se han obtenido resultados satisfactorios con Random Forest mediante la combinación de UAV y HMLS (94% de acierto global), con datos satelitales LiDAR GEDI y Landsat 8 (84%), así como con el modelo DART aplicado a la segunda cobertura PNOA-LiDAR (91%). Se evidencia la idoneidad de los datos LiDAR de alta densidad de puntos y de las técnicas *machine learning*.

Palabras-clave: incendios, combustible forestal, laser escáner, clasificación.

1. INTRODUCCIÓN

Los bosques están expuestos a diversas perturbaciones, tanto naturales como antrópicas, que alteran el equilibrio del ecosistema y disminuyen su capacidad de proporcionar bienes y servicios esenciales a la sociedad. Entre las principales perturbaciones en los entornos mediterráneos se encuentran los incendios forestales, cuyos efectos pueden ser devastadores. Para predecir la propagación y el comportamiento del fuego durante un incendio, es fundamental estimar los parámetros del combustible forestal. En la práctica, es habitual clasificar los combustibles en diferentes tipos de vegetación que presentan un comportamiento similar frente al fuego; estos se conocen como modelos de combustible.

En la literatura científica pueden encontrarse diferentes clasificaciones de tipos de combustible. Por

ejemplo, el proyecto Prometheus (1999) se adaptó a las características de la vegetación mediterránea, definiéndose siete tipos que tienen en cuenta la altura y la cobertura de los elementos propagadores del fuego. El desarrollo de la teledetección supuso un avance por la posibilidad de extrapolar los resultados de las primeras estimaciones de combustibles *in situ* a espacios más amplios. La cartografía de combustibles ha sido generada utilizando inicialmente sensores multiespectrales de resolución media (Riaño et al., 2002), sensores hiperespectrales a bordo de aeronaves (Lasaponara & Lanorte, 2007), sensores LiDAR aéreos (García et al., 2011) y combinando sensores activos y pasivos (Jakubowski et al., 2013).

Con el desarrollo de los sensores activos láser, como el LiDAR, se abrió la posibilidad de mejorar la estimación de la carga de combustible y la estructura de la vegetación, superando las limitaciones de las imágenes multiespectrales de sensores ópticos pasivos, que solo captan el dosel superior. El LiDAR permite obtener información detallada sobre el perfil vertical de la vegetación mediante la captura de nubes de puntos 3D con diversas densidades. Por ese motivo, desde hace una década, el Grupo GEOFOREST inició una línea de investigación centrada en la estimación de modelos de combustible utilizando esta tecnología LiDAR.

El objetivo de este trabajo es realizar una síntesis de los resultados obtenidos en la estimación de tipos de combustible en ambientes mediterráneos con diversos sistemas LiDAR aeroportados de huella discreta y baja densidad de puntos (Domingo et al., 2020; Montealegre et al., 2017; Revilla et al., 2021), satelitales de onda continua (Hoffrén et al., 2023), terrestres móviles (Hoffrén et al., 2024) y portados en *Unmanned aerial vehicles*, UAV (Hoffrén et al., en prensa). Todo ello utilizando trabajo de campo para obtener la verdad terreno y diferentes técnicas de clasificación supervisada: métodos paramétricos de máxima probabilidad (Montealegre et al., 2017), modelos no paramétricos *machine learning* como *Random Forest*, *RF*, y *Support Vector Machine*, *SVM* (Domingo et al., 2020; Hoffrén et al., 2023; Revilla et al., 2021) y modelos físicos basados en modelos de transferencia radiactiva como *Discrete Anisotropic Radiative Transfer*, DART (Revilla et al., 2021).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología empleada en la mayoría de las investigaciones sigue pasos similares con algunas variaciones. En primer lugar, es fundamental obtener la verdad terreno o variable dependiente, en este caso el tipo de combustible, que suele requerir un intenso trabajo de campo. En segundo lugar, se debe procesar la información proveniente de teledetección, que conformará la colección de variables independientes. Finalmente, se lleva a cabo la modelización del fenómeno a estimar, que conlleva el entrenamiento y la validación del modelo. En los siguientes apartados se detallan los aspectos más destacados de cada trabajo.

2.1. Trabajo 1 - PNOA LiDAR y SPOT 5

El objetivo era cartografiar los modelos de combustible presentes en el Centro de Adiestramiento (CENAD) "San Gregorio" (Montealegre et al., 2017), situado en la provincia de Zaragoza. Para ello, se visitaron, entre julio y septiembre de 2014, un total de 108 parcelas circulares, de 15 m de radio, en las que se identificó el tipo de combustible de acuerdo con la clasificación Prometheus (1999).

Para generar las variables independientes se utilizaron los datos públicos del PNOA LiDAR de la primera cobertura, capturados en 2011. Las nubes de puntos fueron filtradas utilizando el algoritmo de curvatura multiescala implementado en el software MCC 2.1. Con posterioridad, se interpolaron estos puntos utilizando el método "Point-TIN-Raster" implementado en el software ArcGIS para crear un modelo digital de elevaciones (MDE) de 1 m de resolución espacial. Una vez normalizadas las alturas de los puntos mediante la utilización del software FUSION LDV 3.30, se derivó un conjunto de métricas que presentan relación con la estructura forestal, aplicando un umbral a las nubes de puntos de 0,20 m, al objeto de eliminar los retornos del suelo. Las métricas se calcularon para una malla regular de 10 m de resolución espacial. Además, para lograr una mejor caracterización vertical de los combustibles, se generó una serie de bandas (BL) con información sobre el porcentaje de retornos LiDAR dentro de un rango específico de altura: de 0-0,5 m (BL1), 0,5-1 m (BL2), 1-2 m (BL3), 2-4 m (BL4), >4 m (BL5), 3-3,5 m (BL6), 3,5-4 m (BL7) y 1-4 m (BL8). Se utilizó también una imagen del satélite SPOT-5 (29/08/2010) y se calcularon los índices de vegetación NDVI y NDII.

Para el proceso de modelización, al trabajar a nivel de píxel, se asignó el modelo de combustible por superposición con las parcelas de campo a un total de 2.314 píxeles, añadiendo 392 píxeles correspondientes a suelo desnudo. Esta muestra inicial se dividió de forma aleatoria: un 10% para la validación (267 píxeles) y un 90% para el entrenamiento (2.439). En la selección de las variables independientes se aplicó la prueba estadística de Kruskal-Wallis, ya que no se pudo asumir la normalidad de las variables. Además, se aplicaron dos técnicas de combinación de información para reducir la dimensionalidad de las variables, ACP y MNF. El último paso es el ajuste y validación de los modelos en el que se aplicó una clasificación digital supervisada

utilizando el método paramétrico de máxima probabilidad. La validación consistió en la generación de matrices de confusión y porcentajes de acierto global, aplicando además el estadístico Kappa.

2.2. Trabajo 2 - PNOA LiDAR y Sentinel 2

El objetivo de este segundo trabajo era la estimación de combustibles en un entorno mediterráneo más amplio que incluyera tres tipos diferentes de bosques dominados por pinares de *P. halepensis*, *P. pinaster* y *P. nigra*, encinares de *Q. ilex* y quejigares de *Q. faginea*, utilizando datos ALS y Sentinel-2. La zona de estudio se localizaba en tres grandes incendios forestales de 1994 situados en Montmajor, Yeste y Requena (Domingo et al., 2020). Los combustibles se identificaron en 136 parcelas de campo durante 2017 y 2018.

En este caso se utilizaron los datos PNOA LiDAR adquiridos entre 2015 y 2016. El procesamiento fue similar al del Trabajo 1 y, además de las métricas LiDAR citadas con anterioridad, se derivaron tres índices de diversidad estructural: LHDI, LHEI y *rumple*. También se utilizaron nueve imágenes libres de nubes de Sentinel-2, que se descargaron con procesamiento 1C y fueron preprocesadas de forma estándar con el *plug-in* Sen2cor de SNAP. Se generó un compuesto anual y se derivaron cinco índices de vegetación diferentes: NDVI, NDII, NDWI, MNDWI y NBR, así como humedad, verdor y brillo de la transformación *Tasseled cap*.

En la selección de las variables independientes se utilizaron el coeficiente de correlación de *Spearman* y la selección de todos los subconjuntos, que proporciona un grupo adecuado de variables en las que los modelos deben centrar su atención. Posteriormente se compararon tres métodos de regresión: dos variantes del modelo SVM mediante la aplicación de *kernel* lineal, SVMl, y radial, SVMr (en cada uno se probaron variaciones del parámetro de coste dentro del intervalo 1–1.000 y del parámetro gamma dentro del intervalo 0,01–1) y RF, ajustando el número de árboles entre 1 y 3.000 y el número de variables para dividir los nodos entre 1 y 3. Los modelos se validaron utilizando un muestreo aleatorio estratificado del 25% y se ejecutaron 100 veces para incrementar su robustez, calculando los porcentajes de acierto global de la matriz de confusión.

2.3. Trabajo 3 - Modelos DART en PNOA LiDAR

El objetivo de este trabajo era analizar la idoneidad del modelo DART para replicar las nubes de puntos del PNOA LiDAR para la clasificación posterior de modelos de combustible. El interés de este trabajo era reducir el intenso trabajo que implica la determinación de combustibles en campo. Se simuló 104 parcelas del Trabajo 1 utilizando las características del sensor y del vuelo de las dos coberturas PNOA LiDAR (2011 y 2016).

La precisión de las simulaciones realizadas se midió utilizando la correlación *Spearman* entre las métricas simuladas y las obtenidas de los datos LiDAR capturados y procesados de la misma forma que en el Trabajo 2. Del mismo modo, se aplicaron los métodos de selección de variables utilizados en el Trabajo 2, aunque se calcularon únicamente las dos variantes del modelo SVM mediante la aplicación de *kernel* lineal y radial. La clasificación se entrenó utilizando las métricas simuladas y se validó con las métricas obtenidas de los datos PNOA LiDAR, calculándose las matrices de confusión y los aciertos globales.

2.4. Trabajo 4 – GEDI, PNOA LiDAR y Landsat 8

Este trabajo evaluó la capacidad de los datos de la misión GEDI en solitario y en combinación con información de Landsat-8 sensor OLI para la estimación de modelos de combustible (Hoffrén et al., 2023). Los datos GEDI utilizados están almacenados en las huellas con diferentes niveles de procesamiento de la Versión 2: Nivel 2A con métricas de elevación y altura (L2A), Nivel 2B con métricas de la cobertura del dosel y en perfil vertical (L2B) y Nivel 4A con métricas de la densidad de biomasa superficial (L4A). Se descargaron 59.554 huellas de 45 orbitas registradas entre abril de 2019 y diciembre de 2021. Las huellas tuvieron que ser filtradas para asegurar la calidad de las mismas utilizando el atributo *'quality flag'*. Asimismo, se descartaron las huellas adquiridas durante el día para evitar los efectos del ruido solar. Para evitar huellas con potencial desplazamiento se utilizó el atributo *'degrade flag'*. Finalmente, para asegurar la homogeneidad en el tipo de combustible de las huellas, se eliminaron todas aquellas con alta heterogeneidad de la cobertura del suelo en función del percentil 99 de altura del PNOA LiDAR. Las imágenes mensuales de junio, julio y agosto de 2019, 2020 y 2021 de Landsat-8 con un porcentaje de cobertura de nubes inferior al 10% siguieron un procesamiento estándar en *Google Earth Engine* y se generaron 4 índices de vegetación: NDVI, NDMI, *Enhanced Vegetation Index* (EVI) y *Soil Adjusted Vegetation Index* (SAVI) y las variables *Tasseled Cap*.

Debido a la imposibilidad de visitar las huellas para asignar el modelo de combustible, la verdad terreno la conformó la integración de dos cartografías previas, generadas en el Trabajo 1 (Montealegre et al., 2017)

y en el Trabajo 3 (Revilla et al., 2021) en el entorno del CENAD “San Gregorio”. En la selección de variables se utilizó la correlación de Spearman para determinar la dirección y fuerza de la relación entre los tipos de combustible y las variables generadas con los datos GEDI y Landsat-8. Además, los test de Kruskal-Wallis y Dunn determinaron la existencia de diferencias significativas entre los tipos de combustible que permitieron una mejor clasificación. Los métodos de clasificación y validación fueron similares a los del Trabajo 2.

2.5. Trabajo 5 - LiDAR UAV y LiDAR terrestre

En este trabajo se evalúa la capacidad de los datos LiDAR capturados con un sensor montado en UAV en 73 parcelas distribuidas por la Comunidad Autónoma de Aragón (Almudévar, Ayerbe, Uncastillo, Villarluengo y Zuera) para la clasificación de modelos combustibles (Hoffrén et al., en prensa). Además, los datos recopilados de un sistema HMLS en 43 de las 73 parcelas se utilizaron para evaluar el grado de mejora en la identificación de combustibles resultante de la fusión de los datos del UAV y HMLS.

El instrumento principal utilizado en los vuelos realizados entre marzo y mayo de 2023 fue una unidad UAV DJI Matrice 300 RTK (DJI) equipada con un sensor LiDAR DJI Zenmuse L1. Se utilizó un patrón de vuelo serpentino con una superposición del 80% entre escaneos tanto en dirección transversal como a lo largo de la trayectoria, con un ángulo de incidencia cenital y una velocidad de vuelo de 7 m/s. Además, se recopilaron datos con un sistema GeoSLAM ZEB-Horizon HMLS (GeoSLAM) a finales de mayo de 2023 como parte del estudio desarrollado por Hoffrén *et al.* (Hoffrén et al., 2024). El sensor LiDAR del UAV funcionó a una velocidad de escaneo de 240.000 puntos por segundo, capturando hasta 3 retornos por pulso láser. La densidad promedio de las nubes capturadas fue de 452 puntos/m². El UAV estaba equipado con un sistema RTK que permitía georreferenciar datos en tiempo real sin necesidad de puntos de control terrestres en campo.

Los datos obtenidos se sometieron a preprocesamiento utilizando el software propietario DJI Terra v.3.6.7. El procesamiento posterior se realizó siguiendo los pasos utilizados en trabajos anteriores, pero los MDE para la normalización de las alturas se generaron a 0,20 m y se aplicó un límite de altura de 0,05 m para la extracción de las métricas. La selección de variables, modelización y validación fue similar al Trabajo 4.

3. COMPARACIÓN DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Comparación de modelos

El mayor acierto global (ver Anexo 1) se ha obtenido en el último trabajo con la combinación de información del sensor Zenmuse L1 montado en UAV y el HMLS con el clasificador RF (95%). En segundo lugar, se encuentra la utilización de modelos DART con el clasificador SVMr (91%). El clasificador RF también ha dado buenos resultados para el sensor Zenmuse L1 sin HMLS (81%) y GEDI combinado con Landsat-8 (84%). La combinación PNOA 2015-16 con Sentinel-2 presenta resultados discretos con el clasificador SVMr como mejor opción (59%), quizá debido a la mayor diversidad de la muestra.

3.2. Consideraciones sobre las características intrínsecas a la tecnología

Con respecto a la resolución espacial, los sistemas terrestres y los UAV-LiDAR presentan densidades de puntos extremadamente altas (>1.000 p/m²) y muy altas (>100 p/m²) que facilitan la clasificación. Los datos PNOA LiDAR, con una densidad baja (<1 p/m²), normalmente requieren la combinación con información multispectral para obtener mejores resultados de clasificación. Los registros SLS no son espacialmente continuos sino huellas de diámetro circular separadas ciertos metros cada una de ellas.

Respecto a la resolución temporal, los sistemas terrestres y los UAV brindan al usuario libertad completa para la toma de datos en distintos momentos. El PNOA LiDAR tiene una resolución temporal baja, pues tarda aproximadamente 5 años en realizar una cobertura nacional completa. Finalmente, en el SLS GEDI no existe garantía de revisita de una huella dada la órbita variable de la Estación Espacial Internacional; de hecho, es muy improbable.

En relación al coste económico para el usuario, los sistemas GEDI y el PNOA LiDAR no implican inversión económica inicial, independientemente del equipo de computación necesario para el tratamiento de los datos. Por el contrario, los UAV-LiDAR y los sistemas terrestres son bastante costosos.

En cuanto a la cobertura espacial, el PNOA LiDAR permite cubrir la totalidad del territorio nacional. Los UAV tienen una cobertura menor, de carácter regional-supralocal. En el caso de GEDI, aunque su cobertura es casi global, los datos no son continuos, sino que se encuentran discretizados en huellas de diámetro circular. Finalmente, los sistemas terrestres sólo permiten cubrir áreas a escala de parcela forestal.

En cuanto a la precisión en la localización planimétrica y altimétrica, puede llegar a ser submétrica en el PNOA LiDAR, los UAV y los sistemas terrestres, mientras que el error medio en GEDI puede ser de 10 m.

3.3. Consideraciones sobre la capacidad de procesado y análisis de los datos

En relación a los requerimientos computacionales, en el caso de los UAV LiDAR no suelen ser muy elevados, aunque el tamaño de los archivos sí puede ser bastante voluminoso. Las aplicaciones del PNOA LiDAR suelen cubrir un área más extensa que los UAV-LiDAR y, por lo tanto, contienen una mayor cantidad de información que manejar. Los sistemas terrestres suelen necesitar altas capacidades computacionales debidas, principalmente, a la extrema densidad de las nubes de puntos a manejar. Finalmente, los SLS pueden producir una abrumadora cantidad de información debido a su amplia escala de trabajo.

Con respecto a la accesibilidad al tratamiento, para el PNOA LiDAR y los registrados con UAV se dispone de una amplia variedad de herramientas para el tratamiento de las nubes de puntos y el procesamiento típico de los datos. Para los datos GEDI, aunque pueden ser tratados de manera completa con software libre, no existe tanta disponibilidad de herramientas, especialmente si se trabaja directamente con la onda LiDAR continua. Por su parte, en los sistemas terrestres el procesamiento inicial de los datos se realiza mediante herramientas comerciales específicas, normalmente desarrolladas por el propio fabricante del instrumento.

En relación a la intensidad del trabajo de campo requerido, en el caso de GEDI y PNOA LiDAR este se reduce a la toma de datos en campo (i.e., inventario forestal) para la evaluación del sistema en cuestión. Con los sistemas UAV además es necesario desplazarse al área de vuelo y puede conllevar tareas adicionales, como el registro de puntos de control sobre el terreno, para georreferenciación indirecta de los datos adquiridos, o el acceso a lugares inaccesibles por necesidades del vuelo (e.g., aterrizaje en zonas llanas). Finalmente, para los sistemas terrestres es necesario recorrer el interior de las parcelas forestales.

4. CONCLUSIONES

Transcurrida una década desde el inicio de los trabajos en la estimación de tipos de combustible con diferentes técnicas de teledetección LiDAR se puede concluir que se han obtenido buenos resultados con el clasificador Random Forest mediante la combinación de UAV y HMLS (94% de acierto global), con datos satelitales LiDAR GEDI y Landsat 8 (84%), así como con el modelo DART aplicado a la segunda cobertura del PNOA-LiDAR (91%). Se pone de manifiesto, de forma muy significativa, la idoneidad de los datos provenientes de sensores activos LiDAR de alta densidad de puntos y de las técnicas *machine learning*.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Instituto Universitario de Ciencias Ambientales (IUCA) de la Universidad de Zaragoza, el Ministerio de Ciencia e Innovación (proyecto SERGISAT CGL2014-57013-C2-2-R), el Gobierno de Aragón (GEOFOREST S51_23R cofinanciado con FEDER "Construyendo Europa desde Aragón") y los proyectos CUD 2013-04, 2020-07, 2024-18 y CUD-Unizar UZCUD2018-HUM-01. Se agradece el apoyo de la beca Postdoc Margarita Salas financiada por Next GenerationEU a Darío Domingo [MS-240621].

5. BIBLIOGRAFÍA

- Domingo, D., de la Riva, J., Lamelas, M. T., García-Martín, A., Ibarra, P., Echeverría, M., Hoffrén, R. (2020). Fuel Type Classification Using Airborne Laser Scanning and Sentinel 2 Data in Mediterranean Forest Affected by Wildfires. *Remote Sensing*, 12(21). <https://doi.org/10.3390/rs12213660>
- García, M., Riaño, D., Chuvieco, E., Salas, J., Danson, F. M. (2011). Multispectral and LiDAR data fusion for fuel type mapping using Support Vector Machine and decision rules. *Remote Sensing of Environment*, 115(6), 1369-1379. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.01.017>
- Hoffrén, R., Lamelas, M. T., de la Riva, J. (2024). Evaluation of Handheld Mobile Laser Scanner Systems for the Definition of Fuel Types in Structurally Complex Mediterranean Forest Stands. *Fire*, 7(2), 59. <https://doi.org/10.3390/fire7020059>
- Hoffrén, R., Lamelas, M. T., de la Riva, J. (en prensa). Classification and mapping of fuels in Mediterranean forests using a LiDAR UAV and integration possibilities with handheld mobile laser scanner systems. *Remote Sensing*.
- Hoffrén, R., Lamelas, M.T., de la Riva, J., Domingo, D., Montealegre, A.L., García-Martín, A., Revilla, S. (2023). Assessing GEDI-NASA system for forest fuels classification using machine learning techniques. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.*, 116, 103175. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.103175>

- Jakubowski, M. K., Guo, Q., Collins, B., Stephens, S., Kelly, M. (2013). Predicting Surface Fuel Models and Fuel Metrics Using Lidar and CIR Imagery in a Dense, Mountainous Forest. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 79(1), 37-49. <https://doi.org/10.14358/PERS.79.1.37>
- Lasaponara, R., Lanorte, A. (2007). Remotely sensed characterization of forest fuel types by using satellite ASTER data. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.*, 9(3), 225-234. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2006.08.001>
- Montealegre, A. L., Lamelas, M. T., Garcia-Martin, A., de la Riva, J., Escribano, F. (2017). Metodología para la caracterización de combustibles forestales mediante técnicas de teledetección y trabajo de campo. En M. Durán Cenit y R. González Abellán, *Los estudios militares y de seguridad en los albores del Siglo XXI* (Vol. 2, pp. 571-588). Editorial Universidad de Granada.
- Prometheus (1999). *Management techniques for optimization of suppression and minimization of wild-fire effects. System Validation*. European Commission. Contract number ENV4-CT98-0716.
- Revilla, S., Lamelas, M., Domingo, D., de la Riva, J., Montorio, R., Montealegre, A., García-Martín, A. (2021). Assessing the Potential of the DART Model to Discrete Return LiDAR Simulation—Application to Fuel Type Mapping. *Remote Sensing*, 13(3), 342. <https://doi.org/10.3390/rs13030342>
- Riaño, D., Chuvieco, E., Salas, J., Palacios-Orueta, A., Bastarrika, A. (2002). Generation of fuel type maps from Landsat TM images and ancillary data in Mediterranean ecosystems. *Canadian Journal of Forest Research*, 32(8), 1301-1315. <https://doi.org/10.1139/x02-052>

Anexo 1. Comparación de modelos.

Trabajo	Fuentes	Variables	Modelo	Acierto global (%)	Kappa
1	PNOA 2011; SPOT 5	Bandas SPOT-5 + NDVI + BL1,4,5,6,7,8 + EM, P75, V, %Ret	Máxima probabilidad	73	0,7
		ACP componentes 1 a 9 (bandas SPOT-5 + NDVI + BL1,4,5,6,7,8 + EM, P75, V, %Ret)	Máxima probabilidad	61	0,6
		MNF componentes 1 a 8 (bandas SPOT-5 + BL1,4,5,6,7,8+ EM, P75, V, %Ret) + NDVI	Máxima probabilidad	72	0,7
2	PNOA 2015/16	P25 + % all ret. above mean + rumple	SVMr	57	NA
		P25 + % all ret. above mean + rumple	SVMI	58	NA
		P25 + % all ret. above mean + rumple	RF	54	NA
	PNOA 2015/16; Sentinel-2	P25 + % all ret. above mean + NDVI + rumple	SVMr	59	NA
		P25 + % all ret. above mean + NDVI + rumple	SVMI	56	NA
		P25 + % all ret. above mean + NDVI + rumple	RF	56	NA
3	PNOA 2016	P80 + Elev. L.CV + Mean 0_0.6 + Rumple + LHDI	SVMr	91	NA
		P80 + Elev. L.CV + Mean 0_0.6 + Rumple + LHDI	SVMI	72	NA
4	GEDI	RH85+ PAI + AGBD	SVMr	62	0,51
		RH85+ PAI + AGBD	SVMI	57	0,45
		RH85+ PAI + AGBD	RF	62	0,51
	GEDI; Landsat-8	RH85+ PAI + AGBD+ Brightness	SVMr	82	0,77
		RH85+ PAI + AGBD+ Brightness	SVMI	81	0,76
		RH85+ PAI + AGBD+ Brightness	RF	84	0,79
5	UAV-Zenmuse L1	Elev. P99 + Elev. P10 + Elev. stdev. + All returns > 4 m + LHDI	SVMr	78	0,72
		Elev. P99 + Elev. P10 + Elev. stdev. + All returns > 4 m + LHDI	SVMI	75	0,67
		Elev. P99 + Elev. P10 + Elev. stdev. + All returns > 4 m + LHDI	RF	81	0,76
	UAV-Zenmuse L1; HMLS	Elev. P99 + Elev. P10 + Elev. stdev. + All returns > 4 m + LHDI + Volume 0.60 – 2 m	SVMr	86	0,82

		Elev. P99 + Elev. P10 + Elev. stdev. + All returns > 4 m + LHDI + Volume 0.60 – 2 m	SVMI	82	0,77
		Elev. P99 + Elev. P10 + Elev. stdev. + All returns > 4 m + LHDI + Volume 0.60 – 2 m	RF	95	0,94

Modelado y geovisualización de variables antrópicas para el cálculo de vulnerabilidad ante riesgos de eventos extremos climáticos: plazas turísticas en Andalucía.

J.M. Camarillo Naranjo, I. Vallejo Villalta, J.Ojeda Zújar, E. Sánchez Rodríguez

Departamento de Geografía Física y AGR, Universidad de Sevilla. C. Doña María de Padilla s/n, 41004 Sevilla.

jmcamarillo@us.es, <https://orcid.org/0000-0003-0152-6357>

ivallejo@us.es, <https://orcid.org/0000-0001-7077-259X>

zujar@us.es, <https://orcid.org/0000-0002-4672-064X>

esanchez@us.es, <https://orcid.org/0000-0001-7446-4236>

RESUMEN: Los eventos extremos de temperaturas (días >40º y nº de días en olas de calor) se han incrementado en los últimos años y, prácticamente, en todos los escenarios futuros se produce una intensificación de su frecuencia e intensidad ligados a los efectos del cambio climático. En esta comunicación se presentan los resultados de la evaluación de la exposición y vulnerabilidad a ambos eventos extremos para los establecimientos y plazas turísticas de Andalucía. Las fuentes de datos utilizadas para los establecimientos y plazas turísticas proceden del Registro Andaluz de Turismo (Consejería de Turismo, Cultura y Deporte) a fecha de 2021, así como, para la peligrosidad de ambos eventos extremos, las proyecciones de cambio climático según el último informe del IPCC (2021 y 2022) que conforman los escenarios locales de cambio climático en Andalucía (Consejería de Sostenibilidad, Medio ambiente y Cambio Climático). Ambos conjuntos de datos se han integrado en un gestor de bases de datos espacial (PostGRES/PostGIS). Con el uso de diferentes funciones SQL y SQL espacial se han calculado diferentes indicadores de exposición y vulnerabilidad para el conjunto de todos los establecimientos y plazas turísticas de la región y sus diferentes tipologías (hoteles, apartamentos, viviendas de fines turísticos, etc.) considerando el escenario menos restrictivo en emisiones para la última trentena de años del siglo XXI, así como su comparación con los indicadores de exposición y vulnerabilidad generados utilizando los datos de peligrosidad actual. Por otra parte, para facilitar la exploración interactiva de los datos e indicadores calculados, se han generado clientes web (geovisores y *dashboards*) utilizando la plataforma CARTO con el diseño de diferentes herramientas para la geovisualización (generación de semiología, leyendas dinámicas, animación de series temporales, etc.), así como la exploración interactiva de los datos con la utilización de widgets categóricos, de histogramas, de fórmulas o de series temporales.

Palabras-clave: escenarios de cambio climáticos, vulnerabilidad turística, geovisores, *dashboard*.

1. INTRODUCCIÓN

Los estudios de vulnerabilidad frente al cambio climático son actualmente uno de los grandes retos de investigación que puede encontrarse en las publicaciones especializadas de los últimos años. Especialmente importantes son aquellos estudios que se aplican sobre la estructura de la población o los distintos sectores económicos que pueden verse afectados en sus impactos por el aumento de temperatura esperado y pronosticado por los distintos modelos climáticos en las próximas décadas. En este sentido, uno de los sectores más estudiados por la importancia en el PIB de numerosos países, siendo España un ejemplo paradigmático, es el sector turístico (D. Scott, C. Michael Hall, S. Gössling, 2019). La generación de indicadores específicos de vulnerabilidad turística frente al cambio climático es una de las herramientas de análisis más utilizada para abordar esta cuestión científica.

En este trabajo nos hemos centrado, en una primera aproximación, al análisis de la vulnerabilidad del sector turístico en Andalucía. Esta aproximación tiene una doble vertiente: por un lado, la importancia ya referida de este sector económico en la estructura económica de Andalucía representando un 12% de la

misma (2022) y por otro lado la identificación del número de plazas en establecimientos turísticos disponibles como aproximación a la población flotante potencial y su distribución espacial por el territorio andaluz.

2. METODOLOGÍA

2.1. Selección de las variables relativas a los datos de establecimientos turísticos de Andalucía y de las variables de riesgo de extremos climáticos derivados de los escenarios de cambio climático en la región (VI Informe IPCC)

La fuente de datos utilizada para los establecimientos y plazas turísticas ha sido el Registro Andaluz de Turismo (Consejería de Turismo, Cultura y Deporte) a fecha de 2021. Este registro turístico ofrece la información asociada a cada uno de los establecimientos turísticos por tipología que operan en el territorio andaluz. Las tipologías turísticas son las siguientes: establecimiento Hotelero, apartamentos turísticos, viviendas con fines turísticos, complejo turístico rural, casa rural y campamento de turismo.

Adicionalmente para cada uno de estos establecimientos se ofrecen los datos de plazas turísticas que son ofertadas por cada uno de los establecimientos y que va a suponer la variable clave para analizar la vulnerabilidad asociada a los extremos térmicos climáticos proyectados en los escenarios climáticos.

Como fuente de datos para la peligrosidad se han utilizado los ficheros descargables de la adaptación (*downscaling*) a Andalucía de las proyecciones de cambio climático según el último informe del IPCC (2021 y 2022) que son accesibles a través del visor de consulta de los escenarios locales de cambio climático en Andalucía (Consejería de Sostenibilidad, Medio ambiente y Cambio Climático). Entre las variables ofrecidas se encuentran especialmente dos, las cuales representan eventos extremos de temperatura, número de días con temperaturas superiores a 40 grados centígrados y la duración de las olas de calor (número de días de duración). Ambas variables han sido obtenidas para el periodo histórico (1961-1990), el periodo actual (1985-2013) y para el periodo proyectado 2071-2100 en el escenario menos restrictivo según el VI Informe del IPCC.

2.2. Integración en base de datos espacial (PostgreSQL/PostGis) de los datos seleccionados y cálculo de indicadores de riesgo iniciales

2.2.1. Generación de base de datos espacial y tratamiento previo de los datos brutos

En primer lugar, se diseñó la herramienta ETL (*Extract, Transform and Load*) para cada uno de los archivos *shapefile* de descarga de la fuente original en los que depuraron errores de localización (puntos fuera de los límites territoriales de Andalucía) y se filtraron los atributos necesarios para los análisis propuestos.

Paralelamente se procedió a la importación de los *grid* de variables de eventos extremos térmicos como rejilla vectorial (tabla con geometría poligonal) en el esquema compartido de la base de datos en la que se realizaron los análisis.

Finalmente se generó una vista personalizada con la integración de todas las tipologías de alojamientos turísticos con una estructura homogeneizada de los atributos comunes.

Este modelo de datos permitirá en una segunda fase generar el código SQL de análisis y de generación de indicadores de vulnerabilidad y riesgo cuyas vistas SQL asociadas serán las que se mostrarán en el cliente avanzado de geovisualización que es el elemento central de esta comunicación.

2.2.2. Cálculo de indicadores (*vulnerabilidad turística y riesgo ante eventos extremos térmicos*)

Para mostrar la versatilidad y capacidad de exploración intensiva de los datos analizados por parte del cliente avanzado diseñado y desarrollado, han sido generados e incorporados dos indicadores iniciales que han sido asociados a los puntos que representan los establecimientos de alojamiento turístico en Andalucía:

- Indicador de vulnerabilidad: número de plazas asociadas a cada establecimiento. Esta variable tiene, además de un valor intrínseco ya que representa la capacidad turística de la región y por tanto es una medida de posibles impactos en una actividad económica de gran importancia en el PIB regional, un valor de vulnerabilidad que se asocia a la población flotante que en determinadas épocas del año aumenta los efectivos poblacionales residentes en un número muy importante de personas (34 millones de turistas en el año 2023 según las estadísticas oficiales -Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía, 2024-).
- Indicador de riesgo: se ha generado un indicador de riesgo calculado como el producto de los valores de peligrosidad asociados a los dos eventos extremos térmicos y el número de plazas turísticas de cada establecimiento. Este cálculo, asociado al punto representado por el establecimiento,

se ha generado para el periodo histórico y por lo tanto representa un valor de riesgo actual y también para el periodo proyectado, entendiendo que este cálculo es una simplificación que representa un punto de partida de la estructura económica actual y su repuesta a extremos futuros.

2.3. Generación de clientes web (geovisor y dashboard) en la plataforma Cloud de CARTO

Para optimizar la geovisualización, exploración y análisis de las variables e indicadores obtenidos, se han desarrollado clientes web ligeros en un entorno *cloud* (geovisor, *widgets* y *dashboard*), que responden a una de las prioridades de la Unión Europea en materia de ciencia abierta para facilitar el acceso, la explotación y la difusión de los resultados de la investigación a través de internet. Una vez integrada la base datos de indicadores en la plataforma de CARTO, la herramienta “*Builder*” permite numerosas posibilidades para la exploración interactiva (utilización de widgets categóricos, de histogramas, de fórmulas o de series temporales) y el análisis de los datos. Tras decidir cómo visualizar los datos (semiología), el tipo de widgets (categóricos, de histograma, etc.) a utilizar para su exploración, agrupación y filtrado, su publicación en internet a través de un cliente ligero es directa y automática, sin que se requiera el uso de código. En definitiva, se trata de clientes orientados a la exploración interna de los datos integrados espacialmente ofreciendo múltiples posibilidades para la geovisualización de los resultados a través de filtros y selecciones interactivas, pudiendo anidarse varias de ellas (ver Ojeda et al., 2021 para datos de renta a nivel municipal, Prieto y Ojeda, 2024 para erosión costera o Camarillo et al, 2019 para datos climáticos globales).

3. RESULTADOS

Los resultados obtenidos se sintetizan en dos apartados: (i) la expresión cartográfica de los *indicadores de vulnerabilidad y riesgo calculados y definidos en el apartado anterior*; y (ii) la generación de un *cliente web (geovisor y dashboard) que permite explorar los resultados para un conjunto mayor de variables de forma interactiva y su geovisualización multiescalar*.

3.1. Indicadores de vulnerabilidad y riesgo frente al aumento de extremos térmicos

Vulnerabilidad del sector turístico al aumento de extremos térmicos: La Figura 1 permite observar, como ejemplo de indicador de vulnerabilidad, el número de establecimientos turísticos según el número de días por encima de 40º C en el periodo actual mediante selección de los menús de selección implementados en el geovisor. Como puede observarse, son las zonas del valle del Guadalquivir y los establecimientos localizados en las mismas, aquellas que presentan unos valores de extremos más acusados (9200 establecimientos tienen 7 días o más al año de temperaturas superiores a 40ºC), siendo las zonas litorales aquellas en las que, como consecuencia del efectos termorregulador del mar, presentan un menor número de días de rigor térmico en las máximas diarias.

La Figura número 2 es la misma representación si bien referida a la proyección sobre el periodo 2071-2100 y en ella podemos observar un impacto de gran calibre tanto en la extensión de las zonas afectadas por un número de días mayor de temperaturas extremas como, lógicamente, un número mucho más alto de establecimientos turísticos que se verían afectados por estas condiciones extremas (85000 establecimientos con 7 días o más de temperaturas máximas diarias por encima de 7ºC y 32000 establecimientos con más de 20 días).

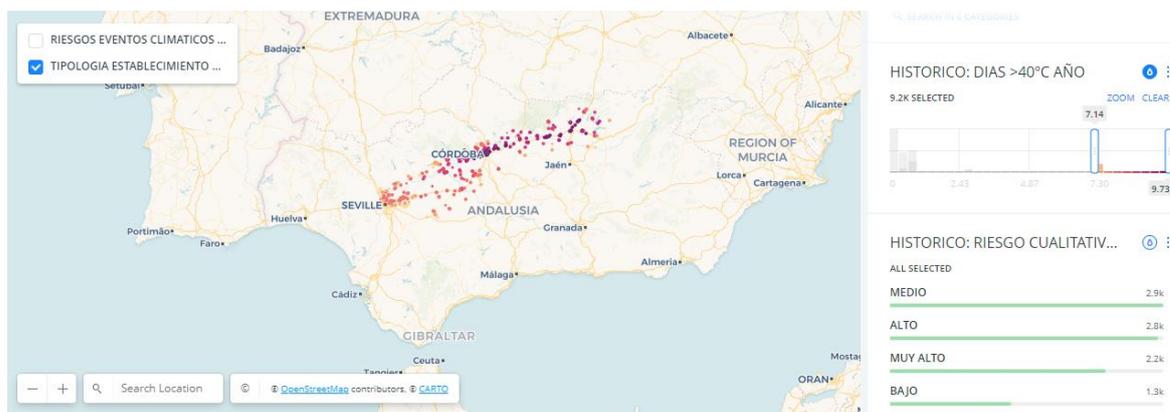


Figura 1. Indicadores de vulnerabilidad frente a temperaturas máximas diarias superiores a 40ºC (periodo histórico)

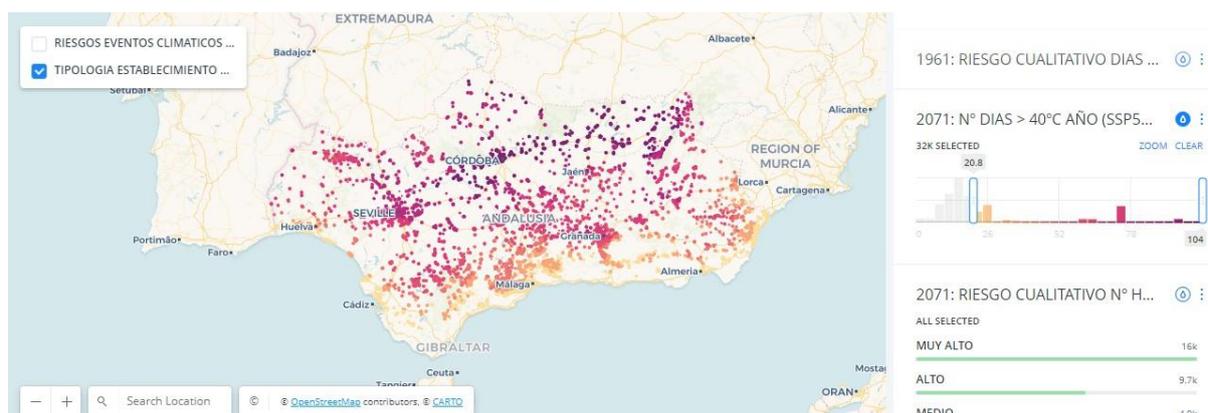


Figura 2. Indicadores de vulnerabilidad frente a temperaturas máximas diarias superiores a 40°C (periodo 2071-2100)

Indicador de riesgo del sector turístico frente al aumento de extremos térmicos: las figuras 3 y 4 representan el indicador de riesgo frente a los aumentos de situaciones térmicas extremas, en este caso relacionando las plazas turísticas y la peligrosidad en número de días con temperaturas superiores a 40°C. Para una mejor comprensión se ha clasificado dicho indicador en valores categóricos basados en quintiles que van desde el riesgo extremos (gran número de plazas turísticas y un número de días muy alto con temperaturas extremas) a un riesgo bajo que se correspondería con zonas con pocas plazas ofertadas y número días de calor extremo también bajos o moderados). Se representan las cartografías de los periodos históricos y proyectados que van a permitir una comparación interactiva en el cliente por parte de los usuarios.

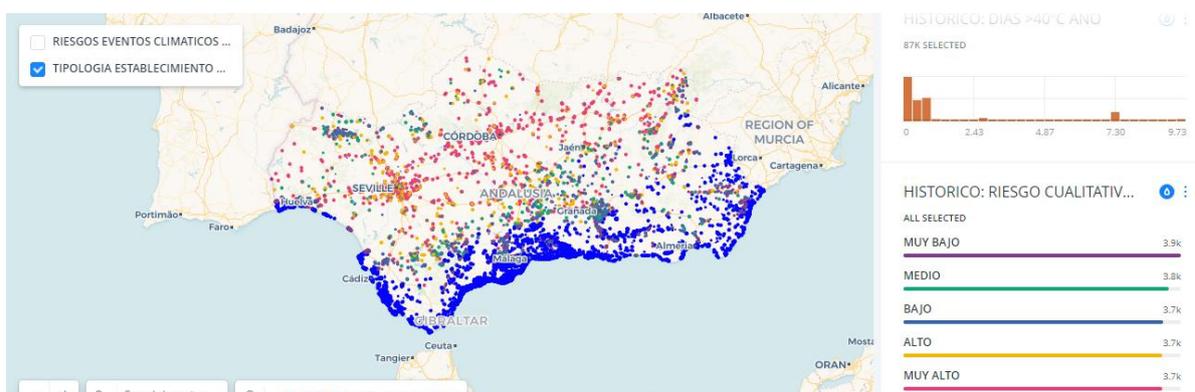


Figura 3. Indicador de riesgo turístico frente a temperaturas máximas diarias superiores a 40°C (periodo histórico)

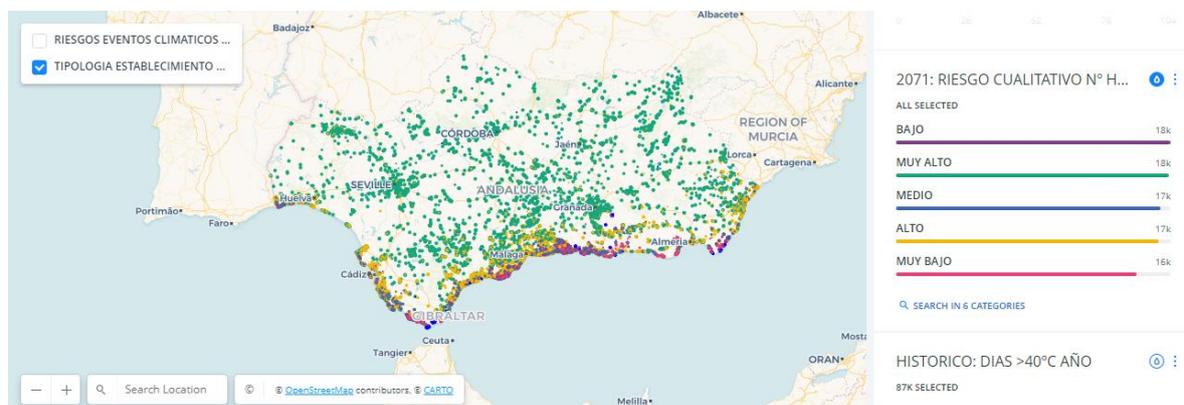


Figura 4. Indicador de riesgo turístico frente a temperaturas máximas diarias superiores a 40°C (periodo 2071-2100)

3.2. Clientes web para la geovisualización y exploración interactiva de los datos

Resultados complementarios y más detallados para cualquier ámbito de Andalucía se recogen en los enlaces al cliente web desarrollado (Figura 5): Indicador de vulnerabilidad de establecimientos y plazas turísticas ante escenarios extremos del clima en Andalucía: <https://universidad-sevilla.carto.com/u/univ-sevilla-admin/builder/342b802b-f907-48f3-a618-9dc034fdc230/embed>

CAPA PUNTUAL DE ESTABLECIMIENTOS TURÍSTICOS	Interacciona cuando se activa con las siguientes variables y widgets:
Widgets de fórmula (valores agregados): se recalculan en función del área de visualización y la elección de filtros con widgets de histograma o categóricos:	Número de establecimiento turísticos (2021)
	Número total de plazas turísticas (2021)
Widgets categóricos: filtran y seleccionan espacialmente el área de análisis por:	Tipología de establecimiento turístico
	Riesgo cualitativo de días de olas de calor para el escenario SSP585 para el periodo 2071-2100
	Riesgo cualitativo de días de olas de calor para el escenario SSP585 para el periodo histórico (1985-2013)
	Riesgo cualitativo de días de olas de calor para el escenario SSP585 para el periodo histórico (1961-1990)
	Riesgo cualitativo de días con más de 40°C para el escenario SSP585 para el periodo 2071-2100
Widgets categóricos: filtran y seleccionan espacialmente el área de análisis	Riesgo cualitativo de días con más de 40°C para el escenario SSP585 para el periodo histórico (1985-2013)
	Riesgo cualitativo de días con más de 40°C para el escenario SSP585 para el periodo histórico (1961-1990)
	Municipio
	Provincia
	Widgets de histograma: filtran y seleccionan por el valor de las variables:
Número de días de olas de calor para el escenario SSP585 para el periodo 1985-2013	
Número de días de olas de calor para el escenario SSP585 para el periodo 1961-1990	
Número de días con más de 40°C para el escenario SSP585 para el periodo 2071-2100	
Número de días más de 40°C para el escenario SSP585 para el periodo 1985-2013	
Número de días más de 40°C para el escenario SSP585 para el periodo 1961-1990	
Fecha de inscripción del establecimiento turístico	

Figura 5. Interfaz y variables representadas en el cliente web para la estructura turística en Andalucía.

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos muestran el interés intrínseco de obtener productos cartográficos que relacionen variables del sector turístico y variables de extremos climáticos, tanto actuales como proyectados, por la importancia que para dicho sector económico representa la evolución del clima y, especialmente, de los fenómenos extremos térmicos que se relacionan con factores como el confort climático, las necesidades de refrigeración, la disponibilidad de refugios climáticos o la propia percepción de los destinos.

En este sentido, la posibilidad de integrar datos relacionados con estas variables en base de datos espaciales y construir vistas espaciales SQL de indicadores, junto con el diseño de clientes basados en geovisores y *dashboards* de consulta, ofrecen una amplia gama de posibilidades de exploración de la estructura de los datos en tiempo real. Estas posibilidades diseñadas, que pueden testarse en el geovisor desarrollado y disponible en la URL facilitada, generan, además, no solamente herramientas avanzadas de consulta cartográfica, gráfica y alfanumérica sobre los datos e indicadores, sino que además van a permitir y facilitar el proceso de generación de hipótesis de investigación, el descubrimiento de relaciones entre variables o la detección de patrones espaciales.

Por tanto, la generación de clientes web orientados a la exploración interna de los datos brutos e indicadores suponen un avance significativo en relación a otros clientes que ofrecen la información tanto semiológica como estadística de forma más estática y menos interactiva, convirtiéndose no solo en herramientas para la difusión y geovisualización de los datos, sino en verdaderas herramientas de análisis y trabajo para los potenciales usuarios (ciudadanos, administración o científicos) que permiten testar diferentes expresiones de los indicadores de forma interactiva.

AGRADECIMIENTOS

Parte de los resultados de este trabajo se realizaron en el contexto de los siguientes proyectos: “Infraestructuras científicas para la vigilancia y adaptación al cambio global en Andalucía” (INDALO_Lifewatch) y PID2019-106834RB-I00 (RiskMACLOUD) Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades; P18-FR-2574 (CLOUDRISK_A) Junta de Andalucía (Consejería de Economía y Conocimiento).

5. BIBLIOGRAFÍA

- Camarillo Naranjo, Juan Mariano, Álvarez Francoso, José Ignacio, Limones Rodríguez, Natalia, Pita Lopez, M^a Fernanda, Aguilar Alba, Mónica (2019). The global climate monitor system: from climate data-handling to knowledge dissemination. En: *International Journal of Digital Earth*. Vol. 12. Núm. 4. Pag. 394-414
- Daniel Scott, C. Michael Hall, Stefan Gössling (2019). Global tourism vulnerability to climate change, *Annals of Tourism Research*, Volume 77, 49-61)
- Ojeda Zújar, J., Paneque Salgado, P., Sánchez Rodríguez, E., Pérez Alcántara, J.P. (2021). Geografía de la renta de los hogares en España a nivel municipal: nuevos datos y nuevas posibilidades de geovisualización, exploración y análisis espacial en entornos cloud. *Investigaciones Geográficas*, 76, 9-30. <https://doi.org/10.14198/INGEO.18993>
- Prieto Campos, A., Ojeda Zújar, J. (2024). Methodology of data generation and calculation of erosion rates applied to littoral areas: Evolution of the Andalusian shoreline on exposed beaches during the 21st century (2001-2019). *Investigaciones Geográficas*, 81, 9-31. <https://doi.org/10.14198/INGEO.25242>

Series multitemporales armonizadas de NDVI aplicadas al análisis de la recuperación vegetal post-fuego desde una perspectiva fenológica

R. Hoffrén¹, D. Borini Alves², C. Iranzo¹, R. Serrano-Notivoli¹, R. Montorio¹, F. Pérez-Cabello¹

¹ Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio; Instituto Universitario en Ciencias Ambientales de Aragón, Universidad de Zaragoza. C/ Pedro Cerbuna 12, 50009 Zaragoza (Aragón).

² Universidade Estadual Vale do Acaraú, Curso de Geografia, Sobral, Estado do Ceará (Brasil).

rhoffren@unizar.es, <https://orcid.org/0000-0002-9123-304X>

danielborini.geo@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6658-7017>

c.iranzo@unizar.es, <https://orcid.org/0000-0002-3359-6213>

roberto.serrano@unizar.es, <https://orcid.org/0000-0001-7663-1202>

montorio@unizar.es, <https://orcid.org/0000-0001-7403-1764>

fcabello@unizar.es, <https://orcid.org/0000-0003-4831-4060>

RESUMEN: Los bosques se ven afectados recurrentemente por el fuego, ocasionando modificaciones en la composición y estructura de la vegetación, así como alteraciones en su patrón fenológico estacional. A pesar de la resiliencia de las especies mediterráneas, los procesos de sucesión secundaria post-fuego pueden desembocar en diferencias a medio plazo, dependiendo de la severidad y de las anomalías climáticas tras el incendio. El objetivo de este estudio es analizar la recuperación de las curvas fenológicas de referencia a lo largo de 5 años post-fuego. La metodología aplicada se organiza en 6 fases: (1) generación de series armonizadas de NDVI mediante colecciones Landsat; (2) análisis de la distribución de la severidad del fuego (RdNBR); (3) identificación de la vegetación prefuego; (4) caracterización de líneas de base fenológica de referencia; (5) caracterización termo-pluviométrica post-fuego; y (6) cuantificación del grado de resiliencia mediante el análisis de la velocidad de recuperación y de las diferencias entre el nuevo estado estacionario y el original. La evolución de la magnitud de las diferencias está vinculada al progresivo desarrollo de la vegetación en la zona quemada (incremento lineal a partir del 2º año), pero también al ciclo vegetativo de los pinares abiertos de pino carrasco y a su sensibilidad a las anomalías secas y húmedas. El análisis de las diferencias puede utilizarse como un indicador del grado de maleabilidad en términos de recubrimiento y actividad fotosintética, pero parece aconsejable caracterizar el grupo control desde dos perspectivas diferentes: la fenológica estacional promedio que minimice el impacto de la coyuntura de humedad sobre el patrón de NDVI cada año; y la específica de cada año.

Palabras-clave: OBIA, Fenología, Incendio forestal, Landsat, Series armonizadas, NDVI, *Pinus halepensis*.

1. INTRODUCCIÓN

En los ecosistemas mediterráneos del centro de la Depresión del Ebro dominados por el pino carrasco (*Pinus halepensis* Mill.) el fuego ha sido y sigue siendo un importante factor modelador de las propiedades fisionómicas y eco-fisiológicas de estas formaciones. Esta especie y el matorral esclerófilo que la acompaña, dominado especialmente por la coscoja (*Quercus coccifera* L.), exhiben una alta capacidad de adaptación al fuego, sustentada en la eficacia de sus estrategias reproductivas: conos seróticos con propiedades termo-dehiscentes que facilitan la liberación masiva y sincronizada de semillas, en el caso del pino carrasco, y rebrote de raíz, rizoma o cepa, en el caso de la coscoja. Este hecho les permite alcanzar niveles de regeneración post-fuego muy elevados (Ne'eman et al., 2004), constituyéndose en una comunidad de baja maleabilidad.

Los productos derivados de técnicas de teledetección espacial son adecuados para el análisis de los cambios y tendencias que experimenta la vegetación después de una perturbación. En relación con los incendios forestales, la información espectral es particularmente útil para cuantificar la regeneración vegetal post-fuego. Las imágenes Landsat y, en concreto, el uso de índices espectrales como el Normalized Differ-

rence Vegetation Index (NDVI) son recursos comúnmente utilizados dado su relación con algunas propiedades de la vegetación (Vélez et al., 2023). No obstante, las limitaciones derivadas de la naturaleza de los neocanales o de la inconsistencia de las series temporales de reflectancia pueden inducir a interpretaciones erróneas sobre la resiliencia de estas comunidades ante el fuego. Además, uno de los problemas más frecuentes al realizar comparaciones entre zonas quemadas y control para medir la maleabilidad reside en la necesidad de garantizar la naturaleza de los sectores comparados en términos de especie vegetal y de las constantes fotosintéticas. Son escasos los trabajos en los que se tiene en cuenta este extremo (Landi et al., 2017), encontrando ejemplos como el uso de mapas de alta fiabilidad, sistemas interactivos de identificación visual de las imágenes previas al fuego, criterios de similitud basados en el cociente entre los valores de NDVI (QNDVI) (Díaz-Delgado et al., 2003) o criterios biológicos basados en la actividad fotosintética medida mediante productos MODIS (e.g., MOD12Q1) (Landi et al., 2017).

La aplicación de procesos de clasificaciones de cubiertas vegetales utilizando imágenes previas a la perturbación es uno de los procedimientos más precisos. En relación con las técnicas y modalidades de clasificación, los estudios basados en el reconocimiento de objetos o unidades ("landscape objects") están diseñados para abordar la clasificación de paisajes heterogéneos y han mostrado su efectividad incrementando la precisión de las clasificaciones. Además, estos clasificadores utilizan todos los recursos disponibles para la correcta identificación de cubiertas: entorno del píxel, color, forma y tamaño de los objetos, siendo la segmentación espectro-espacial la fase principal previa a la clasificación propiamente dicha.

En este marco, el objetivo de este trabajo es cuantificar la maleabilidad de las formaciones vegetales afectadas por un incendio forestal ocurrido en la década de 1990, a través de la comparación multianual de la curva fenológica de áreas control seleccionadas mediante un proceso de clasificación orientada a objeto, teniendo en cuenta la influencia de variables como la severidad del incendio o las características climáticas post-fuego. La utilización de magnitudes multispectrales obtenidas de series consistentes y las prestaciones del análisis de imágenes basado en objetos (OBIA: Object-Based Image Analysis), aplicadas para la identificación de zonas susceptibles de comparación debido a su correspondencia fisiológica y taxonómica, pueden proporcionar una base más fidedigna para reconocer las diferencias en los procesos de regeneración y contribuir positivamente en la gestión forestal de los espacios afectados por el fuego.

2. ÁREA DE ESTUDIO

El incendio tuvo lugar en los Montes de Zuera el 23 de junio de 1995 (≈ 4.000 ha), situado a unos 35 km al norte de Zaragoza, en una zona caracterizada por plataformas estructurales carbonatadas y margosas del Mioceno ubicadas a unos 650 msnm y laderas disecadas por valles de fondo plano ("vales") (Figura 1). El clima es mediterráneo con características semiáridas: bajas precipitaciones (≈ 400 mm) con frecuentes sequías de larga duración y temperatura media de $\approx 12,5^{\circ}\text{C}$ (Cuadrat et al., 2007). El incendio afectó a un bosque de pino carrasco acompañado de coscoja y otras leñosas mediterráneas de carácter heliófilo y xerofítico.

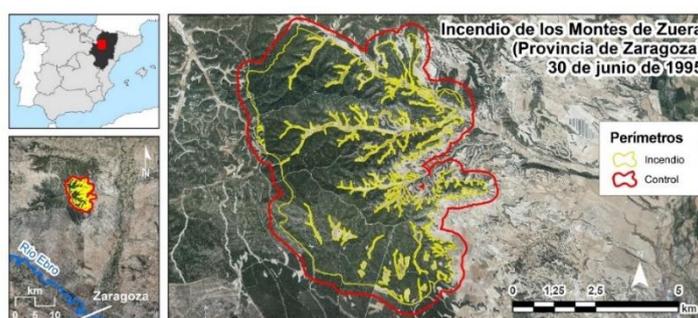


Figura 17. Localización del área de estudio y perímetro correspondiente al incendio de los Montes de Zuera (1995)

3. METODOLOGÍA

La metodología se organizó en 6 fases de aplicación secuencial: (1) generación de series armonizadas de los índices multispectrales para la zona de estudio; (2) análisis cartográfico de la distribución de la severidad del fuego; (3) identificación de la vegetación previa al fuego; (4) caracterización de líneas de base fenológica mediante el NDVI y realización de productos cartográficos de las diferencias entre las curvas fenológicas de referencia y post-fuego; (5) análisis de las condiciones climáticas; y (6) cuantificación del grado de resiliencia mediante el análisis del patrón de oscilación, la velocidad de recuperación del sistema y el análisis de las diferencias entre el nuevo estado estacionario y el original.

Para garantizar la consistencia radiométrica de la colección multitemporal de imágenes se generó, de acuerdo con Borini Alves et al. (2022), una serie armonizada a partir de la cual se extrajo el NDVI (Ecuación 1), lo que permitió disponer, de manera sistemática, de información sobre el estado de la vegetación cada dos semanas. Como variables de entrada se utilizaron imágenes de reflectancia calibrada (TOA) de los satélites Landsat. Los productos resultantes se procesaron para que coincidieran con las bandas de Landsat-8 OLI.

Para el análisis de la severidad, si bien el índice espectral más utilizado es el *Normalized Burn Ratio* (NBR) (Ecuación 2), en este trabajo se utilizó el *Relative delta Normalized Burn Ratio* (RdNBR) (Ecuación 3).

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED) \quad (1)$$

$$NBR = (NIR - SWIR) / (NIR + SWIR) \quad (2)$$

$$RdNBR = dNBR / \sqrt{preFireNBR} \quad (3)$$

Dónde *NIR* es la banda del infrarrojo cercano (≈ 865 nm); *RED* es la banda del rojo (655 nm); *SWIR* es la banda del infrarrojo de onda corta (1610 nm-2200 nm); *dNBR* es el índice delta Normalized Burn Ratio; y *preFireNBR* es el índice Normalized Burn Ratio antes del fuego.

La distribución espacial de la vegetación prefuego se identificó a partir de una adaptación del código de GEE de Tassi y Vizzari (2020) que combina metodologías de clasificación orientada a objeto GEOBIA (*Geographic Object-Based Image Analysis*; para mayor información de dicha metodología, consultar Blaschke, 2010) y algoritmos de *machine learning*. El código implicó la identificación espacial de la distribución de objetos mediante un análisis no iterativo (SNIC: *Simple Non-Iterative Clustering*), la identificación de niveles texturales de los objetos mediante matrices de co-ocurrencia de nivel de gris (GLCM: *Gray-Level Co-occurrence Matrix*) y la clasificación digital supervisada mediante *Random Forest* (RF).

La extracción de la línea fenológica fue implementada a partir de una versión modificada de una parte del método para la detección de cambios AVOCADO (Decuyper et al., 2022), que define para cada píxel una línea de base fenológica. Para los sectores control dicha línea se obtuvo a partir de la media de 300 píxeles distribuidos aleatoriamente sobre la parte no quemada de los objetos. La signatura fenológica de referencia se comparó de manera individual a nivel cartográfico con la quincenal de cada píxel quemado, obteniéndose 48 productos cartográficos por año post-fuego.

Para el análisis de la distribución de la precipitación y la temperatura antes y después del fuego se empleó el índice SPEI (Vicente-Serrano et al., 2012). Los valores se calcularon a partir de datos diarios de precipitación y temperatura del Atlas Climático de Aragón (Cuadrat et al., 2007) mediante modelos GLM y GLMM, usando variables ambientales y topográficas como predictoras (Serrano-Notivoli et al., 2017).

Para analizar la evolución temporal de las diferencias y el comportamiento fenológico, se realizaron tres muestreos de puntos aleatorios ($n=1.800$). A partir de la aplicación de análisis ANOVA en cada fecha (quincenas) y teniendo en cuenta 6 grupos, correspondientes a 3 muestreos en zonas control y 3 en zonas quemadas, se obtuvieron los coeficientes de determinación (R^2) para cada quincena, como indicativos de la proporción de la varianza total del NDVI que es explicada por los sectores; el estadístico de prueba (F), como cociente entre la variabilidad explicada por el modelo sobre la variabilidad no explicada; y el *p-value* ($Pr > F$), como indicador de que, al menos, una de las medias de los grupos es significativamente diferente ($< 0,05$). La maleabilidad se derivó en términos de la magnitud de las diferencias normalizadas entre zona quemada y control. Esta variable a nivel espacial se cartografió en 4 momentos diferentes: post-fuego en que las diferencias son más acusadas (2 meses post-fuego), en los momentos en los que el grupo control muestra los valores de NDVI más contrastados a lo largo de un año fenológico (12 meses post-fuego) y cuando las diferencias promedio considerando los tres muestreos ya no son significativas (36 y 48 meses post-fuego).

4. RESULTADOS

La Figura 2 recoge la distribución de los valores de severidad y los objetos clasificados según los tipos de vegetación prefuego de los sectores control y quemado. Esta clasificación servirá de base para la caracterización de líneas fenológicas de referencia y el análisis de las diferencias entre ambos sectores para un mismo tipo de vegetación; en este caso, los pinares de pino carrasco.

La Figura 3 muestra los cinco ciclos anuales correspondientes al patrón estacional promedio de los sectores quemados y control a lo largo de 6 meses prefuego y 70 post-fuego, así como las diferencias normalizadas. Durante el periodo anterior al fuego se aprecia la solidaridad entre los valores de NDVI en los sectores quemados (rojo) y control (verde) (diferencias normalizadas ≈ 0). Ambos protagonizan un descenso

acusado y continuado, que se relaciona con las condiciones de sequía recogidas antes y en los primeros meses tras el incendio ($SPEI_{6-PRE} = -1,63$), responsables, en gran medida, de los altos niveles de severidad registrados (promedio $RdNBR = 927$) y de las grandes proporciones del incendio (≈ 4.000 ha).

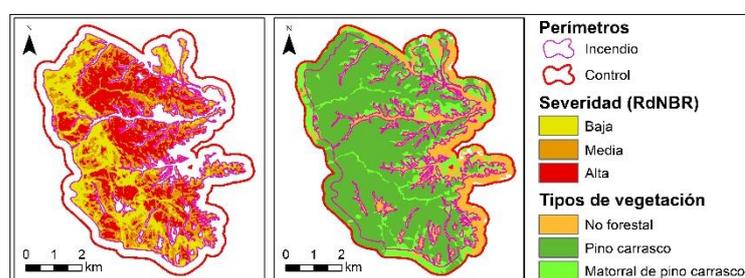


Figura 2. Distribución espacial de los niveles de severidad (izquierda) y de los tipos de vegetación prefuego (derecha).

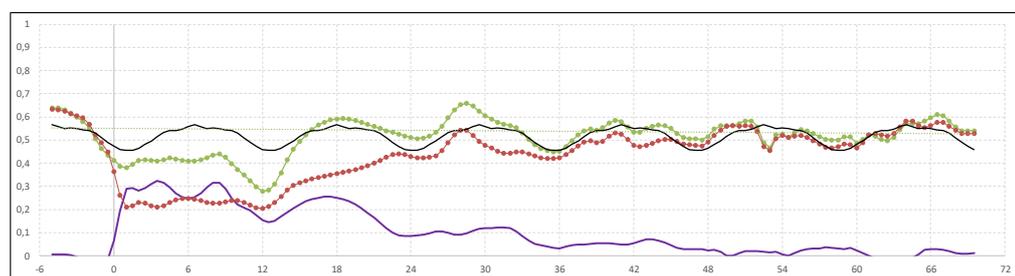


Figura 3. Líneas de base fenológica promedio de los sectores quemados (en rojo), control (en verde), diferencias normalizadas (1995-2001) de los pinares de pino carrasco (en morado), y línea de referencia promedio (en negro). El eje de abscisas representa los meses y el de coordenadas los valores de NDVI.

En relación con la evolución de los sectores quemados, tras un breve periodo después del fuego caracterizado por un decremento en el NDVI, debido a la mortalidad post-fuego, se registra una "meseta" con valores bajos de NDVI ($\approx 0,2$) que se proyecta durante todo el 1^{er} año. Es a partir de julio de 1996 (≈ 12 meses post-fuego) cuando se produce una recuperación lineal sostenida, que se dilata durante el segundo año y el primer trimestre del tercero. A partir de ese momento (28 meses post-fuego) el crecimiento se ralentiza, alcanzando valores medio-altos de NDVI ($\approx 0,5$). De este modo, es durante un breve hiato de 15 meses, pasado un año tras el incendio, cuando se produce la intensidad regenerativa suficiente para alcanzar los niveles de NDVI prefuego. Los sectores control muestran una tendencia ascendente, pero en la que se recogen fluctuaciones intra-anales debido al impacto de las condiciones secas sobre el propio ciclo vegetativo de los pinares de pino carrasco. En este sentido, destacan los descensos a partir de junio/julio, especialmente en el primer y tercer año post-fuego, y los incrementos en los meses de invierno-primavera (excepto durante 1995-1996). La diferente respuesta entre sectores quemados y control pone de manifiesto los efectos del fuego y la dinámica regenerativa, al tiempo que destaca la menor sensibilidad de la vegetación colonizadora a las condiciones de sequía y humedad, al menos en las primeras fases post-fuego.

A partir de la aplicación de análisis ANOVA (Figura 4) se obtuvieron los momentos en los que no hay diferencias significativas entre grupos (barras rojas) o lo que, en términos de maleabilidad, podría interpretarse como los momentos en los que las condiciones de verdor se han completado tras el incendio. Como se observa, esto sucede antes del incendio y, de manera discontinua, a partir de los 48 meses post-fuego (en torno a julio 1999). Sin embargo, la escasa entidad de los coeficientes de determinación (R^2) y de los valores de la prueba (F), registrados 36 meses post-fuego, nos permiten adelantar ese momento a un año antes, en 1998. Por último, la Figura 5 muestra la distribución espacial de las diferencias de los valores no-normalizados de NDVI en la zona quemada respecto a la zona control en un momento prefuego y 4 post-fuego. Se puede observar la anomalía generalizada del NDVI en toda la zona afectada por el incendio durante los primeros 12 meses, siendo a partir de los 36 meses cuando las condiciones de verdor parecen volver a converger con los

de la zona control, tal y como sugieren las escasas diferencias existentes en términos de NDVI.

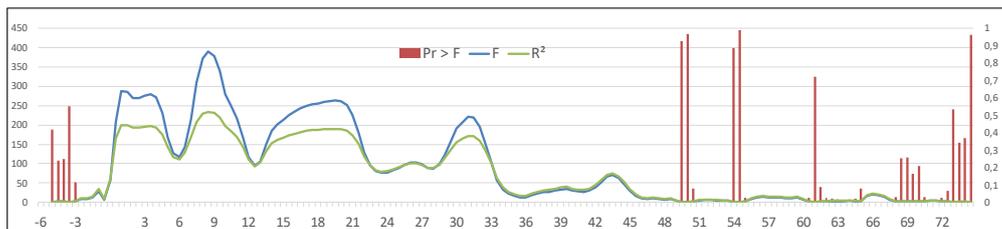


Figura 4. Distribución temporal de los coeficientes de determinación (R^2) (línea verde), estadístico F (línea azul) y p -value (barras rojas), resultados del ANOVA aplicado por quincenas).

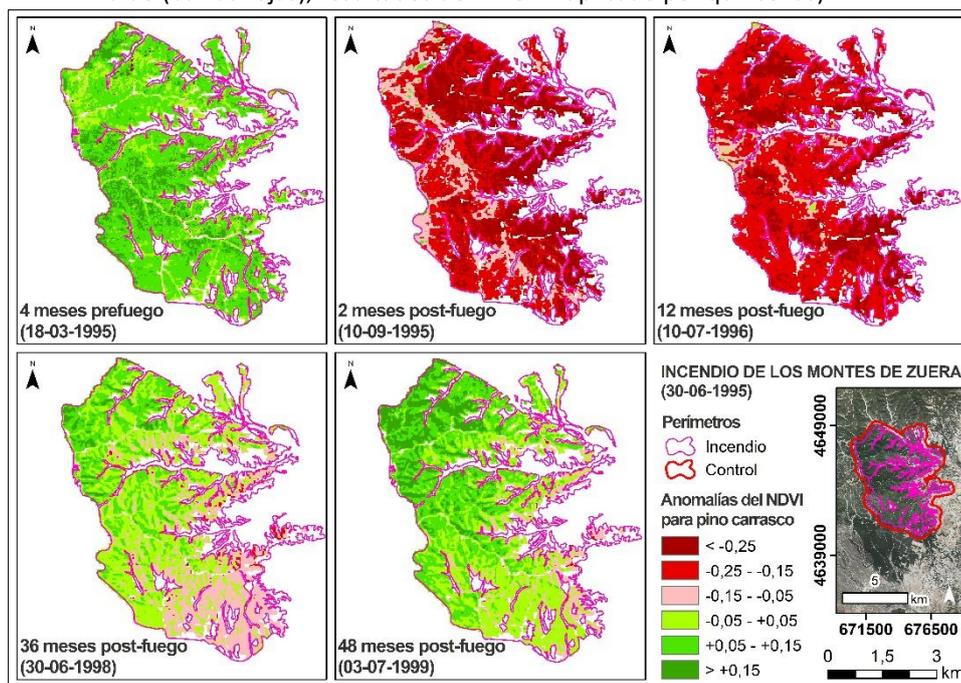


Figura 5. Mapas representativos de las diferencias entre NDVI de los pinares de pino carrasco 4 meses prefuego y 2, 12, 36 y 48 meses post-fuego.

5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La utilización de series temporales de información espectral armonizada derivada de colecciones Landsat ha permitido monitorizar el proceso de regeneración vegetal (en términos de NDVI) de zonas afectadas por el fuego y realizar ejercicios comparativos adecuados entre zonas quemadas y control. A partir de este análisis se han podido derivar indicadores de maleabilidad basados en el análisis de varianza y en la diferencia normalizada entre sectores control y quemados, en la línea de los cocientes empleados por Díaz-Delgado et al. (2003), entre otros trabajos. El conocimiento preciso de la composición y distribución de la vegetación afectada por el fuego mediante OBIA ha resultado especialmente útil en paisajes heterogéneos como los protagonizados por el pino carrasco.

La magnitud de las diferencias entre sectores está vinculada al progresivo desarrollo de la vegetación en los quemados (incremento lineal durante el 2º año), pero también al ciclo vegetativo de los pinares abiertos de pino carrasco y a su sensibilidad a las anomalías secas y húmedas. Las fluctuaciones menores que presentan las zonas quemadas (especialmente en los dos primeros años post-fuego) pueden estar asociadas al diferente tipo de vegetación que coloniza los espacios quemados: formaciones menos sensibles a las variaciones termo-higrométricas, como pueden ser las protagonizadas por masas compactas de matorral de coscoja o los latizales de pinar de pino carrasco de alta densidad. Este último extremo tiene una gran importancia sobre la evolución y magnitud de las diferencias, ya que, en numerosos periodos, el decremento de las diferencias obedece, especialmente, al descenso del NDVI del grupo control, más que al incremento de los quemados (12, 24 y 36 meses post-fuego). Por tanto, esta disminución de las diferencias no debería interpretarse como un proceso de acercamiento entre control y quemados, sino todo lo contrario: la manifestación de la diferente composición florística y/o fisionómica de las formaciones vegetales colonizadoras en

algunas fases del proceso de regeneración.

Aunque el pino carrasco es una especie tolerante a la sequía y al estrés hídrico, durante el verano presenta una ligera disminución del NDVI (Aragonés et al., 2019), siendo en el invierno-primavera el momento en el que se registran los mayores valores de NDVI tras la reanudación de la actividad biológica, en el caso de haber recibido lluvias primaverales. Ello genera cierta dispersión de los valores de NDVI en función del ciclo vegetativo. En este sentido, uno de los aspectos observados está relacionado con el fuerte impacto que tienen las condiciones de humedad y los periodos de sequía de larga duración sobre el patrón estacional. Sin duda, la respuesta fisiológica al estrés estival produce un deterioro de la estructura celular, una parada de la actividad vegetativa y una menor absorción de los pigmentos clorofílicos, lo que, en términos de NDVI, se materializa en el mencionado descenso estival. En este caso, el descenso ha sido especialmente acusado, lo que podría relacionarse con el fuerte impacto de intensidad de la sequía ($SPEI_6 < -1,5$), pero también con la respuesta del cortejo florístico que acompañan a estas formaciones de pinar mediterráneo en el entorno de los Montes de Zuera.

Si bien hasta un año después del fuego no se produce el incremento de los valores de NDVI en las zonas quemadas, a partir de julio de 1996 se asiste a una recuperación lineal sostenida del NDVI, especialmente acusada durante el segundo año y de manera más pausada a partir del segundo año. La estabilización de las diferencias sugiere que los sectores quemados están convergiendo en términos de NDVI, lo que puede interpretarse como un indicador del grado de maleabilidad. Finalmente, parece aconsejable utilizar como grupo control dos posibles perspectivas de análisis: la fenológica estacional promedio que minimice el impacto de la coyuntura de humedad sobre el patrón de NDVI cada año, y la específica de cada año.

AGRADECIMIENTOS

Estudio realizado en el contexto del proyecto I+D+i Retos Investigación: PID2020-118886RB-I00 “Análisis dinámico de la Resiliencia de los Paisajes Forestales afectados por el fuego (PaF) mediante indicadores espectrales multisensor”, financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación/Agencia Estatal de Investigación (10.13039/501100011033); y de los contratos predoctorales del Ministerio de Universidades (FPU18/05027) y de la Convocatoria 2022-2026 (Gobierno de Aragón) otorgados a Raúl Hoffrén y Cristian Iranzo, respectivamente. Roberto Serrano-Notivoli está respaldado por la ayuda RYC2021-034330-I financiada por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y por la Unión Europea NextGenerationEU/PRTR.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Aragonés, D., Aragonés, L., Esteban, J., Valle, J. (2019). Stand characteristics modulate secondary growth responses to drought in Mediterranean pine forests: the role of remotely sensed data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 78, 281-294.
- Blaschke, T. (2010). Object based image analysis for remote sensing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 65(1), 2-16. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2009.06.004>.
- Borini Alves, D., Fidelis, A., Pérez-Cabello, F., Alvarado, S., Conciani, D., Cambraia, B., Silveira, A., Silva, T. (2022). Impact of image acquisition lag-time on monitoring short-term postfire spectral dynamics in tropical savannas: the Campos Amazônicos Fire Experiment. *Journal of Applied Remote Sensing*, 16. <https://doi.org/10.1117/1.JRS.16.034507>.
- Decuyper, M., Chávez, R.O., Lohbeck, M., Lastra, J.A., Tsendbazar, N., Hackländer, J., Herold, M., Vågen, T.G. (2022). Continuous monitoring of forest change dynamics with satellite time series. *Remote Sensing of Environment*, 269, 112829. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112829>.
- Díaz-Delgado, R., Lloret, F., Pons, X. (2003). Influence of fire severity on plant regeneration by means of remote sensing imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 24(8), 1751-1763. <https://doi.org/10.1080/01431160210144732>.
- Landi, M.A., Di Bella, C.M., Ojeda, S., Salvatierra, P., Argañaraz, J.P., Bellis, L.M. (2017). Selecting control sites for post-fire ecological studies using biological criteria and MODIS time series data. *Fire Ecology*, 13(2), 1-17. <https://doi.org/10.4996/fireecology.130274623>.
- Ne'eman, G., Goubitz, S., Nathan, R. (2004). Reproductive traits of *Pinus halepensis* in the light of fire—a critical review. *Plant Ecology*, 171(1-2), 69-79. <https://doi.org/10.1023/B:VEGE.0000029380.04821.99>.
- Serrano-Notivoli, R., de Luis, M., Saz, M.A., Beguería, S. (2017). Spatially based reconstruction of daily precipitation instrumental data series. *Climate Research*, 73, 167-186. <https://doi.org/10.3354/cr01476>.

- Serrano-Notivoli, R., Saz, M.A., Longares, L.A., de Luis, M. (2024). SiCLIMA: High-resolution hydroclimate and temperature dataset for Aragón (northeast Spain). *Data in Brief*, 56, 110876. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2024.110876>.
- Tassi, A., Vizzari, M. (2020). Object-oriented LULC classification in Google Earth Engine combining SNIC, GLCM, and machine learning algorithms. *Remote Sensing*, 12(22), 3776. <https://doi.org/10.3390/rs12223776>.
- Vélez, S., Martínez-Peña, R., Castrillo, D. (2023). Beyond Vegetation: A Review Unveiling Additional Insights into Agriculture and Forestry through the Application of Vegetation Indices. *Journal of Remote Sensing*, 6(3), 421-436. <https://doi.org/10.3390/j6030028>.
- Vicente-Serrano, S.M., Gouveia, C., Camarero, J.J., Beguería, S., Trigo, R., López-Moreno, J.I., Azorín-Molina, C., Pasho, E., Lorenzo-Lacruz, J., Revuelto, J., Morán-Tejeda, E., Sánchez-Lorenzo, A. (2012). Response of vegetation to drought time-scales across global land biomes. *PNAS*, 110(1), 52-57. <https://doi.org/10.1073/pnas.1207068110>.

MaaS4All: simulando la adopción de MaaS desde un enfoque basado en multi-agentes e integrado en SIG

Aitor Salas-Peña¹, Ana Condeço Melhorado¹

¹ Transporte, Infraestructura y Territorio (tGIS), Departamento de Geografía, Universidad Complutense de Madrid (UCM), Profesor Aranguren S/N, 28040 Madrid, España

aisalas@ucm.es, <https://orcid.org/0000-0001-7468-0393>

acondeco@ucm.es, <https://orcid.org/0000-0002-7260-3260>

RESUMEN: En esta comunicación se presenta el modelo basado en multi-agentes MaaS4All, que permite simular el proceso de elección de planes MaaS entre diferentes opciones de movilidad a partir de la interacción entre usuarios/as, operadores de movilidad, tanto públicos como privados, y entorno espacial. El modelo se acopla con SIG con el fin de analizar un entorno densamente provisto de servicios de transporte, como es el Área Metropolitana de Madrid. El objetivo final del modelo es evaluar el impacto de la adopción de MaaS en el sistema de transportes desde una perspectiva social y espacial. En un primer paso, las variables de los agentes reciben valores gracias a la información recogida en una encuesta. A continuación, se definen los procesos que posibilitan la interacción entre agentes. El proceso principal es la toma de decisiones, donde los usuarios/as valoran su plan actual de movilidad siguiendo un proceso de decisión de Markov de acuerdo con diferentes criterios de valoración, recompensando o penalizando el servicio ofrecido por los operadores. Por último, al finalizar su viaje cada agente actualiza sus preferencias en función su valoración y, tras un periodo variable, vuelve a acceder a la red. La iteración de simulaciones permite observar la evolución en la adopción de MaaS en función del lugar de residencia de los usuarios/as y de sus condiciones sociales, y monitorizar su rendimiento bajo diversos escenarios.

Palabras-clave: transporte, MaaS, modelos basados en multi-agentes, SIG, aprendizaje reforzado.

1. INTRODUCCIÓN

Los objetivos de sostenibilidad, eficiencia y asequibilidad de la movilidad urbana promovidos por la Comisión Europea son hoy en día importantes retos para las grandes ciudades. En este sentido, la digitalización y la multimodalidad son elementos indispensables en el diseño de nuevas soluciones integradas e innovadoras que permitan a los operadores ampliar su mercado complementando su oferta de servicios y que faciliten a los usuarios/as una movilidad más flexible y sostenible. La movilidad como servicio (en adelante MaaS) reúne diversos servicios de movilidad que permite la planificación, reserva y pago a través de una aplicación digital (Smith, 2022). Más allá de sus potenciales ventajas en favor de la descongestión y la sostenibilidad, MaaS proporciona la posibilidad de integrar información digital relevante para los usuarios/as de estos servicios (Smith, 2022). Sin embargo, hoy en día no hay evidencia del potencial real de MaaS (Cisterna et al., 2022), por lo que sigue siendo un reto para la mayoría de las grandes ciudades, en cuyas manos está la posibilidad de modelar e incentivar el comportamiento de los usuarios/as mediante la reglamentación de la actividad de los operadores (Sochor et al, 2018).

Uno de los aspectos clave para promover políticas de movilidad eficientes consiste en determinar el impacto de MaaS en las coronas metropolitanas, donde el coche privado sigue siendo la opción predominante (CTM, 2018), debido principalmente a la mayor facilidad de circulación y estacionamiento y al relajamiento de las restricciones medioambientales. Además, la menor oferta de servicios de movilidad respecto al centro de la ciudad supone un importante obstáculo en el cambio de actitud en un grupo de usuarios/as con preferencia por el uso de medios privados, compuesto mayoritariamente por jóvenes de entre 18 y 50 años con familia, ingresos medios-altos y buenas competencias tecnológicas como para aceptar nuevas experiencias de movilidad (Alonso-González et al., 2020). En este sentido, algunos estudios han desarrollado

modelos basados en agentes (en adelante ABM) que aportan alternativas al coche privado sustituyéndolo por medios compartidos, como el acoplamiento entre trenes y vehículos automáticos (Scheltes y de Almeida Correia, 2017) o la sustitución de coches privados por taxis autónomos (Bischoff y Maciejewski, 2016). Inturri et al. (2019) utilizan un ABM para simular diferentes configuraciones de un sistema de servicios compartidos de transporte en función de la demanda, que abarcan desde el coche compartido (car sharing) hasta viajes compartidos (ride sharing). En simulaciones más globales, como muestran Cisterna et al. (2022), los usuarios/as deciden entre servicios de movilidad compartida no integrados en MaaS y una aplicación MaaS, cambiando de alternativa en función del incremento de costes de la experiencia anterior. De modo similar, Becker et al. (2020) elaboran un modelo donde evalúan modos de movilidad compartida simulando la elección de modos de transporte de acuerdo con una función de utilidad orientada hacia la búsqueda del menor coste.

A pesar de la proliferación de estudios y modelos que simulan la implantación de servicios MaaS en diferentes niveles de integración y operatividad, la cuestión adolece esencialmente de una falta de perspectiva social y empresarial (Sochor et al., 2018). En efecto, no sólo es importante el quién y para quién dentro del ecosistema de actores que interactúa en MaaS (Arias-Molinero y García-Palomares, 2020) sino también el cómo y el por qué, es decir, cómo plantean los operadores privados de movilidad compartida la colaboración para complementar el transporte público y por qué algunos usuarios/as perciben barreras que dificultan la implantación de MaaS (Sochor et al., 2018). Teniendo en cuenta ambas perspectivas, este trabajo preliminar plantea un enfoque basado en multi-agentes para analizar el acceso hacia planes MaaS, donde la toma de decisiones de los usuarios/as se realiza mediante un proceso estocástico que evoluciona en el tiempo y donde su dinámica se determina por una función de transición de probabilidad entre planes de movilidad, modos de transporte y acciones. El resto del artículo se organiza como sigue: en la sección 2 se explican los componentes principales del modelo y en la sección 3 se ofrecen las conclusiones.

2. MAAS4ALL: EXPLICACIÓN DEL MODELO

MaaS4All es un modelo basado en agentes integrado en SIG que pretende simular la toma de decisiones de movilidad de los usuarios/as en función de las características y preferencias de cada usuario y de un conjunto de alternativas de movilidad, que van desde el uso de medios propios hasta la adopción de MaaS.

2.1. Propuesta

El objetivo del modelo es predecir la adopción de una aplicación MaaS válida para diferentes tipos de usuarios/as del área metropolitana de Madrid (AMM) y evaluar su impacto tanto en el sistema de transportes como en los ámbitos socioeconómico y medioambiental. Como método de evaluación del modelo, su ajuste a la realidad se fundamenta en la reproducción de al menos tres patrones observables en los hábitos generales de movilidad de los usuarios/as, obtenidos a partir de la encuesta de movilidad de la Comunidad de Madrid (CTM, 2018) y de la encuesta MaaS4All realizada en 2024 en el marco de esta investigación. De tal modo, se asume lo siguiente:

- Preferencia por la ruta más corta y de menor coste, reproducida mediante el algoritmo A-star.
- Preferencia por el uso de coche propio creciente de centro a periferia.
- Preferencia por el uso del metro frente a otros modos de transporte público.

Para ello se plantea el desarrollo e implementación del modelo en cuatro fases. En la primera fase se introducen los elementos espaciales. En la segunda fase se diseñan los agentes que tomarán parte en el modelo, sus variables y comportamientos y capacidad de interacción entre ellos. Una vez completado el modelo, en la tercera fase se diseña el experimento. Por último, se analizan los resultados y se valida el modelo.

2.2. Componentes y ajustes del modelo

2.2.1. Los agentes

A diferencia de otros modelos, ABM permite tanto la modelización de la heterogeneidad de los agentes como la observación del modo en que estos se autoorganizan (Macal y North, 2010). Teniendo en cuenta lo anterior, en nuestro modelo consideramos la participación de los siguientes agentes:

- Los *usuarios/as* son los agentes principales del modelo. Representan a individuos que toman decisiones de movilidad y reaccionan ante cualquier evento ocurrido en el sistema que pueda influir en su modo de proceder.

- Los *operadores* se representan por medio de las instalaciones, accesos o estacionamientos de dispositivos de movilidad existentes en la red de transportes del AMM, tanto públicos como privados.
- Las celdas constituyen el *entorno espacial*. Cada celda representa una porción de terreno del AMM con una extensión de 150x150 metros, donde tienen lugar las interacciones entre agentes.
- El *entorno global* controla las variables globales del modelo.

2.2.2. Variables de usuario

Los usuarios/as forman un grupo de agentes heterogéneo. Cada usuario es autónomo y persigue metas y objetivos de movilidad propios. Sin embargo, estos agentes pueden interactuar entre sí, con los operadores y con el espacio en el que se desenvuelven. Además, pueden evolucionar y adaptarse a nuevas condiciones y objetivos (Izquierdo et al., 2008). En la tabla 1 se muestran estas variables de modo resumido. Exceptuando a las variables conductuales, el resto presentan valores y proporciones con una base empírica, a pesar de lo cual su distribución entre los usuarios/as presenta cierta aleatoriedad.

Tabla 1. Variables de usuarios/as en MaaS4All

<i>Tipo</i>	<i>Variables</i>
Socioeconómicas	Sexo, edad, ocupación, nivel de renta, número de miembros en la unidad convivencial
Operativas	Posesión de vehículo propio, habilidad en el manejo de dispositivos de micromovilidad, código postal de origen, código postal de destino, motivo del viaje, ruta almacenada
Preferencias reveladas	Valoración de los modos de transporte
Preferencias declaradas	Valoración de modos poco o nada utilizados, valoración de MaaS
Evaluadoras	Grado de satisfacción con el plan de movilidad utilizado, expectativa de satisfacción futura respecto al plan utilizado, estimación de la intención de cambio a un plan MaaS

La posibilidad de que un modelo muestre propiedades emergentes dependerá que las variables que lo conforman se comporten de forma no lineal más allá de un umbral determinado. En el caso de nuestro modelo, las variables evaluadoras pueden provocar ese tipo de efecto, dado que son variables dependientes de cierto comportamiento aleatorio en la toma de decisiones. De acuerdo con Batty y Torrens (2001), los modelos más robustos son aquellos en los que distintos procesos determinan los resultados o las predicciones a partir de varias variables independientes.

2.2.3. Escalas espacial y temporal

El modelo integra a través de la extensión GIS varias capas de tipo vectorial y ráster. La extensión del área de simulación se corresponde con los municipios que integran el AMM, proyectado en el sistema de coordenadas 1989 UTM Zone 30N. Cada celda o patch del modelo cubre un área de 150x150m, en una malla de 433x395 celdas. El área total representada es 3848 km², si bien la simulación solo se realiza dentro de los límites del AMM.

Respecto a la escala temporal, debido a la agilidad que requiere la simulación de tránsitos y cambios de modo en un espacio reducido de tiempo, cada tick o unidad de ejecución del modelo equivale a 15 segundos. Así, una simulación finaliza cuando se completa una jornada en horario de servicios activo, entre las 6 AM y las 11 PM. Pueden encadenarse n simulaciones conservando los resultados de la simulación $n-1$.

2.3. Secuenciación de procesos

En cada simulación se inicia y finaliza un número n de viajes con origen y destino en el AMM. A partir tanto de sus expectativas de funcionamiento del servicio, como de su nivel de satisfacción y su disponibilidad al cambio de política de movilidad, cada usuario/a tomará aquellas decisiones que le permitan alcanzar sus objetivos de movilidad.

Los procesos asociados con los usuarios/as son (A1) planificación del viaje, (A2) desplazamiento a través de la red, (A3) valoración de la política utilizada y (A4) permanencia fuera de la red (hibernación). Los

operadores actualizan sus ofertas de servicio (B1) y reaccionan ante incidencias en sus dispositivos o instalaciones (B2). Por su parte, el agente “entorno espacial” identifica zonas de interacción positiva entre usuarios/as de MaaS (C1). Finalmente, el agente “entorno global” activa el proceso que controla el número de usuarios/as que participa en el modelo (D1). Los procesos que estructuran MaaS4All pueden verse en la Figura 1.

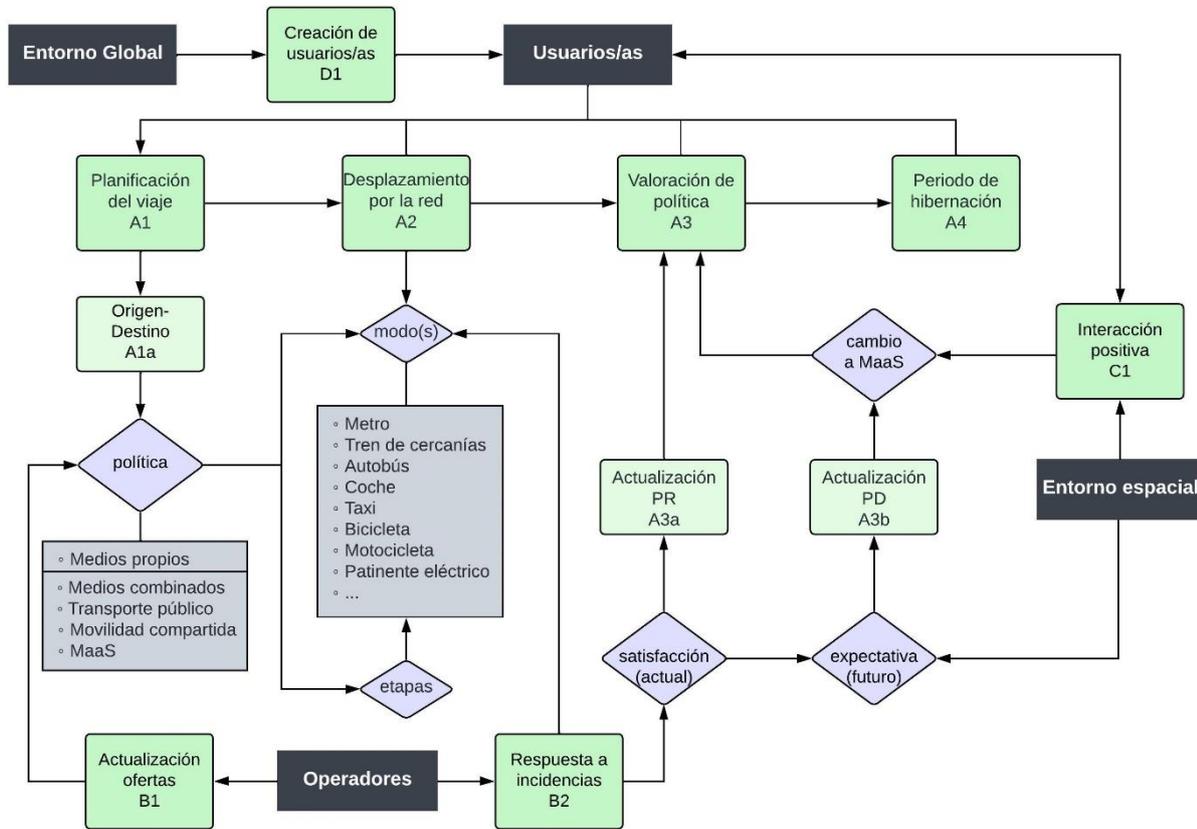


Figura 1. Diagrama de procesos del modelo MaaS4All.

Antes de comenzar una simulación el modelo carga la información espacial (tanto ráster como vectorial) relativa al áreas de estudio y a su red de transporte (metro, tren de cercanías, autobús y parkings de micromovilidad compartida). La simulación comienza generando un número n de usuarios/as iniciales establecido previamente (D1), que se actualizará teniendo en cuenta las horas de máxima afluencia a la red (8:00, 14:00 y 18:00) de acuerdo con una distribución normal con función de densidad $f(x) = (\mu, \sigma)$. Dentro del proceso A1, el origen y destino del viaje se establece mediante un subproceso pseudoaleatorio (A1a) que emplea distribuciones de frecuencia recogidas en matrices origen-destino del AMM (CTM, 2018). A partir de este momento el usuario/a se decide por una de las políticas de movilidad de acuerdo con la oferta existente (B1) y con los valores iniciales de sus Preferencias Reveladas (A3a). La elección de una política da paso a la elección de modo(s) y número de etapas necesarias y al desplazamiento a través de la red (A2).

El proceso de valoración de la política utilizada (A3) es determinante en la toma de decisiones de la política a adoptar en futuros viajes. Esta depende de los valores acumulados de tres variables dependientes. En primer lugar, la *satisfacción* se refiere a la valoración del servicio en función del coste generalizado (Yue et al., 2022). Además, esta se verá influenciada por la capacidad de respuesta de los operadores a la generación de incidencias (B2). Los valores actualizan las Preferencias Reveladas (A3a) del usuario/a referidas a la política utilizada, esto es, las elecciones reales u observadas (Ortúzar y Willumsen, 2011). En segundo lugar, la probabilidad de uso futuro de dicha política se estima en la variable *expectativa*, la cual depende en gran modo del grado de satisfacción actual del usuario. Este valor actualiza a su vez las Preferencias Declaradas (A3b) del usuario/a, es decir, la elección de opciones en situaciones hipotéticas (Ortúzar y Willumsen, 2011) basadas en la experiencia anterior. Además, el entorno espacial puede llegar a interactuar con los usuarios/as (C1) modulando sus respuestas en cuanto a su disposición de *cambio* de hábitos de movilidad hacia una plataforma integrada MaaS. Tras su llegada a destino los usuarios/as permanecen fuera de la red durante un intervalo, denominado periodo de hibernación (D1), cuya duración estimada depende de la naturaleza del

viaje. Por último, los usuarios/as regresan a la red con sus preferencias de políticas de movilidad actualizadas. Finalmente, el modelo asume las siguientes reglas de funcionamiento:

- Los usuarios/as realizan un mínimo de dos viajes y un máximo de 10 en cada simulación.
- El modelo asume los tránsitos a pie entre el origen/destino y el primer/último modo utilizado, si bien no se computa su tiempo de desplazamiento.
- La velocidad de desplazamiento para cada modo de transporte es invariable, a excepción de los desplazamientos en coche.
- Los tiempos de desplazamiento en coche se estiman a partir de la combinación de varias capas ráster relativas tanto a la velocidad media de tránsito como a la densidad de tráfico en el AMM.

2.4. Modelando la toma de decisiones

El proceso de valoración (A3) es clave en la búsqueda de la mejor opción. Dicho proceso se sostiene en la idea del *aprendizaje reforzado* (RL), de acuerdo con el cual los agentes interactúan con su entorno mediante ciclos consecutivos de percepción-acción (Mongillo et al., 2014), que se alimentan de la información acumulada y que al finalizar son recompensados (o penalizados) por cada agente. Así, los procesos de decisión de Markov (MDP) son dinámicas de RL que satisfacen la propiedad de Markov (Sutton y Barto, 2018). Estos procesos estocásticos en tiempo discreto o continuo se utilizan para modelar cambios de estado dentro de un sistema dinámico. Cada estado s se corresponde con un modo de transporte que pertenece a un conjunto finito ($s \in S$) que cada usuario puede utilizar con una probabilidad $p(s)$, donde se cumple

$$1 > p_{ss'}^a > 0, \sum_{s \in S} p_{ss'}^a = 1 \quad (1)$$

De acuerdo con un conjunto de modos de transporte disponibles (estados) y de una serie de acciones posibles, el modelo MaaS4All considera un conjunto finito de planes o políticas en las que los usuarios/as toman decisiones de movilidad en tiempo continuo y posteriormente evalúan el servicio, lo que determinará sus elecciones futuras. De tal modo, de acuerdo con Sutton y Barto (2018), la probabilidad de transitar de un estado a otro viene dada por

$$\Pr\{S_{t+1} = s' \mid S_t = s, A_t = a\} = \sum_{r \in R} p(s', r \mid s, a) \quad (2)$$

donde r son las recompensas obtenidas. La tabla 2 muestra los elementos que toman parte en el proceso de decisión de los usuarios/as. Inicialmente, se asume como regla general que cada usuario busca optimizar sus recursos minimizando el coste generalizado de la ruta.

○ **Tabla 2.** Elementos del proceso de decisión en aprendizaje reforzado

PLANES (π)	ESTADOS (s)	ACCIONES (a)	RECOMPENSAS (r)
Medios propios, movilidad combinada, transporte público, movilidad compartida, MaaS	Metro, tren de cercanías, autobús, taxi, coche, moto, bicicleta, patinete eléctrico	Entrar*, permanecer, cambiar de modo, salir* (* acciones asumidas por el algoritmo de planificación de ruta A-star)	Tiempo de viaje, tiempo de espera, tiempo de transbordo, estacionamiento, coste económico, comodidad, sostenibilidad

El desarrollo del MDP para cada usuario/a será resultado de la relación entre sus variables socioeconómicas y sus preferencias reveladas y declaradas, a partir de la cual tiene lugar el proceso de valoración y generación de recompensas o penalizaciones.

3. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

En este artículo se ha ofrecido una breve descripción del modelo MaaS4All. La propuesta aborda el diseño de la interacción entre multi-agentes y el territorio en un entorno de modelado GIS-ABM, con el fin de simular las condiciones que podrían promover la transición desde hábitos de movilidad disociados y menos sostenibles hacia planes que integran servicios MaaS. El proceso central del modelo lo constituye la toma de decisiones de los usuarios/as, la cual se plantea como un proceso de decisión de aprendizaje reforzado, que combina argumentos determinísticos y estocásticos en una simulación en tiempo continuo a partir de

conjuntos finitos de políticas, estados y acciones. La siguiente fase de la investigación se centrará en incorporar al modelo información desagregada a nivel de tipos de usuario procedente de una encuesta realizada en el Área Metropolitana de Madrid. El modelo se alimentará con información relativa tanto a los hábitos actuales de movilidad como a las preferencias hipotéticas de los usuarios/as. Se espera que el empleo de grupos-tipo de usuarios/as en la simulación de la toma de decisiones facilite la estimación del impacto espacial de la adopción de planes MaaS en áreas metropolitanas.

AGRADECIMIENTOS

La publicación es parte de la actuación CNS2022-136002, financiada por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por la Unión Europea «Next Generation EU»/PRTR.

4. BIBLIOGRAFÍA

- Alonso-González, M. J., Hoogendoorn-Lanser, S., van Oort, N., Cats, O., Hoogendoorn, S. (2020). Drivers and barriers in adopting Mobility as a Service (MaaS) – A latent class cluster analysis of attitudes. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 132, 378-401. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2019.11.022>
- Arias-Molinares, D., García-Palomares, J. C. (2020). The Ws of MaaS: Understanding mobility as a service from literature review. *IATSS Research*, 44(3), 253-263. <https://doi.org/10.1016/j.iatssr.2020.02.001>
- Batty, M., Torrens, P. M. (2001). Modelling complexity: the limits to prediction. *Cybergeo: European Journal of Geography*. <https://doi.org/10.4000/cybergeo.1035>
- Becker, H., Balac, M., Ciari, F., Axhausen, K. W. (2020). Assessing the welfare impacts of Shared Mobility and Mobility as a Service (MaaS). *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 131, 228-243. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2019.09.027>
- Bischoff, J., Maciejewski, M. (2016). Simulation of City-wide Replacement of Private Cars with Autonomous Taxis in Berlin. *Procedia Computer Science*, 83, 237-244. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.04.121>
- Cisterna, C., Bigi, F., Tinessa, F., Viti, F. (2022). Analysis of MaaS membership attributes: An agent-based approach. *Transportation Research Procedia*, 62, 483-490. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.02.060>
- Consortio de Transportes de Madrid (2018). *Encuesta de movilidad de la ciudad de Madrid 2018. Documento síntesis*. Madrid, Consorcio Regional de Transportes de Madrid.
- Inturri, G., Le Pira, M., Giuffrida, N., Ignaccolo, M., Pluchino, A., Rapisarda, A., D'Angelo, R. (2019). Multi-agent simulation for planning and designing new shared mobility services. *Research in Transportation Economics*, 73, 34-44. <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2018.11.009>
- Izquierdo, L. R., Ordax, J. M. G., Santos, J. I., Martínez, R. D. O. (2008). Modelado de sistemas complejos mediante simulación basada en agentes y mediante dinámica de sistemas. *Empiria. Revista de metodología de ciencias sociales*, (16), 85-112.
- Macal, C. M., North, M. J. (2010). Tutorial on agent-based modelling and simulation. *Journal of simulation*, 4(3), 151-162.
- Mongillo, G., Shteingart, H., Loewenstein, Y. (2014). The misbehavior of reinforcement learning. *Proceedings of the IEEE*, 102(4), 528-541. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2014.2307022>
- Ortúzar, J. D., Willumsen, L. G. (2011). *Modelos de Transporte*. Santander, Universidad de Cantabria.
- Scheltes, A., de Almeida Correia, G. H. (2017). Exploring the use of automated vehicles as last mile connection of train trips through an agent-based simulation model: An application to Delft, Netherlands. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 6(1), 28-41. <https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2017.05.004>
- Smith, G., Sochor, J., Karlsson, I. C. M. (2022). Adopting Mobility-as-a-Service: An empirical analysis of end-users' experiences. *Travel Behaviour and Society*, 28, 237-248. <https://doi.org/10.1016/j.tbs.2022.04.001>
- Sochor, J., Arby, H., Karlsson, I. C. M. A., Sarasini, S. (2018). A topological approach to Mobility as a Service: A proposed tool for understanding requirements and effects, and for aiding the integration of societal goals. *Research in Transportation Business & Management*, 27, 3-14. <https://doi.org/10.1016/J.RTBM.2018.12.003>
- Sutton, R. S., Barto, A. G. (2018). *Reinforcement learning: An introduction. Second edition*. MIT press.

Yue, M., Ma, S.-H., Zhou, W., Chen, X.-F. (2022). Estimation Markov Decision Process of Multimodal Trip Chain between Integrated Transportation Hubs in Urban Agglomeration Based on Generalized Cost. *Journal of Advanced Transportation*, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/5027133>

Técnicas de modelado 3D en SIG a partir de datos abiertos para implementar en *City Information Modelling* (CIM)

L. Martín Forero¹

¹Gerencia de Ingeniería Digital y BIM, Subdirección de Proyectos INECO. Avda. Partenón, 4-6 1ª Planta Puerta 1 28042 Madrid

laura.martin@ineco.com

RESUMEN: CIM City Information Modelling es un entorno digital 3D de carácter colaborativo que se asemeja mucho al BIM en los principios de su metodología, pero con un enfoque a escala ciudad y de su entorno. Se concibe como un Sistema de Información Geográfica SIG en 3D compuesto por objetos y modelos tridimensionales que proporcionan gran volumen de información para un mejor diseño, planificación y organización el territorio urbano.

Los escenarios SIG 3D permiten integrar información geográfica diversa en 2D y 3D en el mismo entorno digital permitiendo la construcción de ciudades virtuales. Los objetos y modelos que la componen pueden ser muy variados, desde edificios, puentes, o canalizaciones hasta arbolado, luminarias, señalización vertical, etc. todos tienen cabida en un modelo de datos espaciales integrado, e interdisciplinario. También los datos demográficos, económicos, ambientales o de transporte. Toda la información permanece centralizada en un mismo lugar, y la visualización integral facilita la toma de decisiones, la colaboración entre todos los agentes implicados, e incluso consensos más rápidos y acuerdos innovadores. Ha demostrado ser la mejor plataforma para materializar el CIM.

Este trabajo muestra las técnicas usadas para incorporar diferentes tipos de objetos y modelos en un escenario SIG 3D de la ciudad de Madrid, a partir de datos extraídos del Portal de Datos Abiertos del Ayuntamiento de Madrid y de su Geoportal.

Palabras-clave: City Information Modelling (CIM), Building Information Modelling (BIM), Sistema de Información Geográfica (SIG), 3D

1. INTRODUCCIÓN

El crecimiento urbano mundial ha sido muy significativo en las últimas décadas alcanzando en 2023 el 56% de la población mundial, y se estima que en 2050 pueda llegar al 70%. Este crecimiento urbano se ha demostrado que necesita de estrategias que garanticen un buen planeamiento y equilibrio, para que pueda hacer frente a desafíos complejos de nuestro tiempo. Tanto más difíciles cuanto más desfavorecida es la región en la que se localizan.

En algunas regiones incluso la expansión física urbana ha superado al crecimiento poblacional ocasionando ciudades más dispersas y menos densas, esto junto a una ineficaz planificación urbana provoca otros problemas derivados en el desarrollo urbano como la necesidad de mayor infraestructura de transporte, o problemas ambientales y de sostenibilidad. Asegurar que haya un acceso adecuado a servicios como agua, electricidad, saneamiento, salud y educación es un desafío constante.

El objetivo número 11 de la agenda 2030 de Naciones Unidas fija conseguir para ese año ciudades y comunidades sostenibles “*Para lograr el Objetivo 11, los esfuerzos deben centrarse en implementar políticas y prácticas de desarrollo urbano inclusivas, resilientes y sostenibles que prioricen el acceso a servicios básicos, viviendas asequibles, transporte eficiente y espacios verdes para todos*” Naciones Unidas (2015).

En este sentido, el diseño y la planificación de ciudades usando metodología CIM permite obtener modelos digitales 3D del espacio urbano en los que explorar y testar soluciones antes de ejecutarlas en la realidad. Anticipar los problemas y dificultades antes de que se produzcan permite garantizar la mejor decisión por estar sustentada en los numerosos factores que intervienen, y esta es la mayor fortaleza que aporta esta metodología.

1.1. ¿Qué es CIM?

City Information Modelling se considera una metodología afín a BIM *Building Information Modelling* en cuanto que comparte principios metodológicos como la centralización de la información, su condición colaborativa y aporte de datos semánticos a las entidades tridimensionales digitales. Sin embargo, mientras BIM se centra en modelos a detalle de los activos de un edificio o infraestructura, los modelos de información digital urbana difieren en que necesitan de escalas de trabajo más pequeñas para referenciar a territorios más extensos. Khemlani (2007) extendió y aplicó el modelado de información desde el nivel de edificios al nivel de ciudades por primera vez en un contexto de evaluación de riesgos naturales. Por lo tanto, el CIM fue inicialmente aceptado como una forma de tecnología BIM aplicada específicamente a áreas urbanas.

Xu et al.(2014), explicaron el CIM como la integración de BIM en un sistema de información geográfica SIG y desarrollaron el marco CIM compatible con el formato de datos estándar BIM. Para otros investigadores y profesionales la metodología CIM les sirve para explorar diferentes escenarios y como precursor de los gemelos digitales urbanos (Cureton y Hartley 2023). En definitiva, esta metodología de sirve de un sistema de información geográfica 3D con la funcionalidad de incluir diferentes tipos de modelos tridimensionales georreferenciados, que pueden ser de diferente tipología e incluso simplemente accesorios para mejorar la representación del contexto. Todos estos componentes y la enorme cantidad de información producida deben ser organizada y gestionada de manera efectiva.

Algunos de los componentes principales de CIM son:

- Modelos georreferenciados que aportan información sobre el territorio que pueden ser reales o futuros, diferentes alternativas de diseño o mejoras. Como modelos digitales de elevaciones, características del subsuelo, o modelos de drenaje.
- Modelos de Infraestructura: edificios, carreteras, puentes, tendido eléctrico, canalizaciones, etc.
- Datos Económicos y Demográficos: información poblacional, economía, uso del suelo y otros datos relevantes para la planificación urbana.
- Sensores y Datos en Tiempo Real (IoT): tráfico, calidad del aire, niveles de ruido y condiciones meteorológicas.
- Otros objetos 3D

1.2. ¿Modelado 3D en geografía?

La geografía desde sus orígenes se ha servido de la cartografía como disciplina y sobre todo como medio de comunicación, desde las primeras representaciones sobre la arena o pinturas rupestres, hasta la realidad virtual 3D que vivimos en nuestros días. Un empeño de los seres humanos por representar la realidad del territorio y de su entorno con los soportes que han estado disponibles en cada época de la historia.

Desde el siglo VI a.C. lleva la humanidad creando mapas en 2D **Harley, J. B., & Woodward, D (1987)**, y en apenas 50 años la revolución digital está ahora centrada en visualizar el mundo real cada vez más parecido en el mundo digital. La tecnología ahora permite la representación tridimensional más fiel de objetos y entornos, lo que facilita la comprensión y el análisis de la realidad.

Al igual que los SIG el modelado digital en 3D surgió en los años 60. Iván Sutherland (1963) en su tesis doctoral fue capaz de asentar las bases para el desarrollo posterior de gráficos por computadora y modelado 3D. Su trabajo en *Sketchpad* empezaba a hacer representaciones digitales tridimensionales de objetos reales mediante un software informático especialmente diseñado para ese propósito. Se incorporaron las nociones de profundidad, alto y ancho, así como la posibilidad de escalar, rotar y mover los modelos digitales.

Desde entonces han sido muchos los campos y disciplinas de aplicación, principalmente en la industria automovilística, aeronáutica, aeroespacial, etc. generalmente relacionado este campo con el diseño de objetos, y un poco más tarde en la arquitectura y en otras ingenierías.

Pero es desde el año 2005 cuando la recopilación de datos georreferenciado en 3D empezó a proliferar en todo el mundo ligado también al desarrollo tecnológico, y no solo se recogían, sino que se producían de una forma cada vez más sencilla. El desarrollo de software empezó a responder a una demanda que crecía casi exponencialmente y empezaba a gestionar mejor los modelos y los datos para incrementar todo su potencial. Los avances en la capacidad de procesamiento de datos y el desarrollo de algoritmos de análisis de datos espaciales, permitieron manejar y analizar grandes volúmenes de datos georreferenciados en 3D de manera más eficiente que posibilitaban análisis complejos como se muestra en trabajo de Dougherty (2005)

sobre el uso de SIG, modelos 3D, y tecnologías de construcción para la evaluación de daños y reconstrucción después del paso de un desastre natural, en este caso huracanes.

En el contexto SIG, el software más usado a nivel mundial ArcGIS® de la empresa Esri, lanzó en el año 2000 la versión 8.1 con la extensión con *3D Analyst* y *ArcScene* que incorporó capacidades avanzadas de análisis y visualización en 3D de datos geográficos. Sin embargo, el auge del SIG 3D se ha desarrollado también fuera del software comercial y el mundo open source, ofrece la plataforma CESIUM. *Cesium Ion* fue lanzado al mercado en 2017 como alternativa de plataforma en la nube para la creación, el almacenamiento y la visualización de datos geoespaciales en entornos tridimensionales, utilizando tecnología WebGL para lograr visualizaciones altamente interactivas y realistas en navegadores web.

2. METODOLOGÍA

Las técnicas descritas en este artículo se derivan de la experiencia obtenida al integrar diversos proyectos de ingeniería para la remodelación de la infraestructura ferroviaria de la estación de Atocha en Madrid. Se creó un escenario virtual que integraba BIM y SIG 3D, cuyo objetivo principal fue proporcionar un contexto urbano que gozara de mayor realismo para los proyectos y las futuras obras. Para la visualización y el procesamiento de datos geoespaciales, se utilizaron diversas técnicas de importación de modelos 3D disponibles en el software ArcGIS Pro® (versión 3.2, Esri, Redlands, CA).

2.1. Técnicas de modelado 3D

2.1.1. Simbología 3D

La primera y más sencilla es usar los objetos 3D convencionales como una simbología de capa de puntos. Los modelos convencionales son aquellos que pueden cambiar sus dimensiones fácilmente, es decir se diseñan teniendo en cuenta que luego se pueden escalar, rotar y mover. Y son diferentes a los paramétricos donde en su creación se ha tenido en cuenta las relaciones matemáticas para definir su geometría.

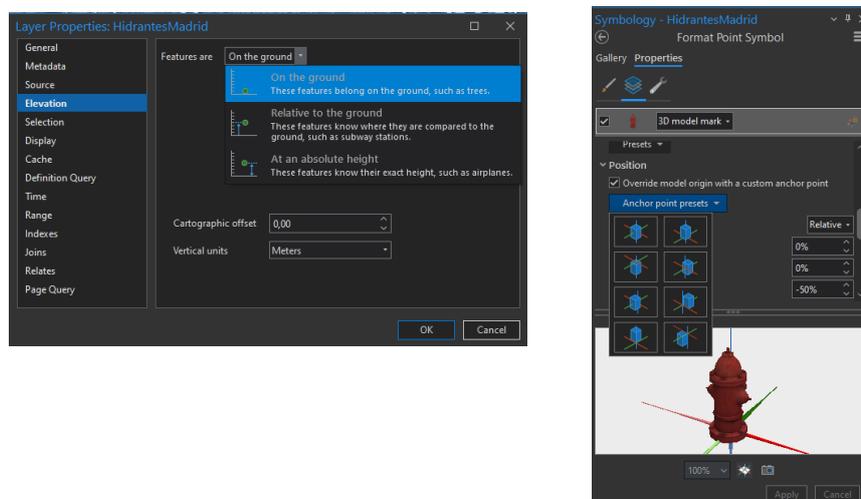


Figura 18. Incorporación de la simbología tipo 3D model mark.

Pues bien, estos modelos convencionales se aplican como simbología de geometría tipo punto como *3D model mark*, el software inserta un modelo 3D en cada ubicación definida por los puntos con coordenadas x,y. Es necesario configurar estos puntos como puntos de anclaje según los ejes de coordenadas y por lo general al ser entidades que no tienen coordenada z, esta simbología debe definirse sobre el terreno.

Los objetos 3D usados en este trabajo fueron obtenidos de diferentes repositorios y librerías que existen en internet como Free3D y Sketchfab. Pueden ser más realistas o simbólicos dependiendo de la complejidad de la geometría de la misma forma que se pueden ser gratuitos o previo pago. Y es necesario tener en cuenta que un mayor realismo puede ir reduciendo el rendimiento de memoria gráfica.

La aplicabilidad es muy sencilla y directa, pero es muy importante saber que cualquier cambio en el aspecto del modelo se aplicará a nivel de capa, a todas las entidades por igual. Los formatos más habituales y que se pueden incorporar directamente en son DAE, 3DS, OBJ y más reciente el glTF.

Esta técnica fue usada con la capa de hidrantes y árboles ubicados en el ámbito. Es muy recomendable por su sencillez si se necesita aplicar a un gran número de objetos 3D donde el giro es despreciable.

Figura 2. Algunos ejemplos de modelos 3D disponibles en librerías de internet



2.1.2. Importación como entidades de una capa a file GDB

La segunda técnica se realiza mediante la importación de los modelos como entidades en sí mismas a una base de datos geográfica o *file GDB*. Esto significa que la geometría del objeto se convierte en editable, es decir, que podemos variar las dimensiones, la rotación, la localización a nivel de entidad individual y no de capa como en la anterior técnica. Esto es necesario para los modelos que necesitan girar sobre sí mismos, orientarse según su localización, por ejemplo, las farolas o señales de tráfico.

También se parte de capas de puntos, pero esta vez como emplazamientos, es decir, en cada uno de ellos se situará un modelo que ya es una entidad, el punto se convierte en un modelo 3D editable y podemos rotar cada una de las señales de forma individualizada. Por el momento el poder incorporar el giro de cada entidad y que el software sea capaz de hacerlo automáticamente de forma masiva no es posible, y debe hacerse manualmente, algo a tener muy en cuenta si es necesario aplicarlo a un gran volumen de ellas.

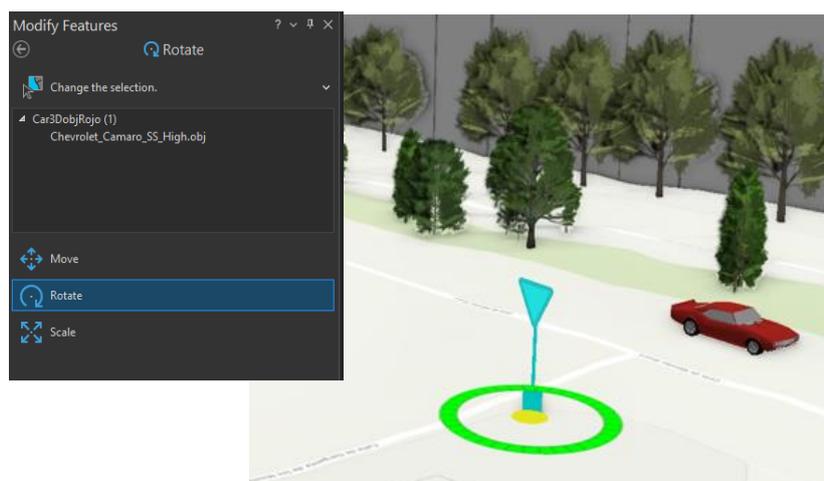


Figura 3. Aplicación del giro de rotación a un modelo 3D

2.2. Tipos de datos

En este trabajo se han utilizado capas de entidades SIG procedentes del Geoportal del Ayuntamiento de Madrid y otros datos descargados de la web de Datos Abiertos del mismo ente.

2.2.1. Entidades 3D

La más representativa en este trabajo quizá sea la capa de edificios 3D representados con un alto nivel de detalle geométrico, incluyendo la forma, altura y estructura general. Poseen un LOD2 *Level of Detail*, nivel de detalle que aporta una geometría que se ajusta a datos topográficos y cartográficos precisos, garantizando una representación fiel del entorno urbano. Además, estos datos tienen asegurados la consistencia y calidad mediante procesos de revisión y validación periódicos. *Se pueden descargar* en formato *multipatch* plenamente compatible con los SIG y que se utiliza para representar superficies tridimensionales. Estas superficies pueden incluir objetos como edificios, terrenos, estructuras subterráneas y cualquier otra entidad que necesite una representación en tres dimensiones.



Figura 4. Vista de algunos edificios 3D en una escena de ArcGIS PRO.

2.2.2. Datos vectoriales 2D

La capa principal y más trabajada ha sido la capa de arbolado y masas arbóreas presentes en los distritos y parques históricos, singulares y forestales de mantenimiento municipal de la Ciudad de Madrid, cuyos atributos, además, facilitan información acerca de la especie y el estado de conservación.

2.3. Otras fuentes de datos

El portal de Datos Abiertos de Madrid ofrece un extenso catálogo de datos muchos de ellos descargables en formato tabla con atributos muy ricos y sugerentes. Esta iniciativa de la administración pública persigue que los datos y la información se publiquen de manera abierta, regular y accesible para todos, sin restricciones de acceso, derechos de autor, patentes u otros mecanismos de control para promover la transparencia, la eficiencia, la participación ciudadana y el desarrollo económico.

Lo singular es que muchos de estos datos están georreferenciados en forma de campos de “coordenada x” y “coordenada y” por lo que de una forma sencilla se pueden crear capas de entidades tipo punto y aplicarles las técnicas ya mencionadas. Este ha sido el caso de las unidades luminosas, hidrantes y señalización vertical.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Si bien este trabajo ha sido realizado con software propietario, se ha comprobado que es capaz de soportar con buen rendimiento la creación de escenarios virtuales con elevado número de entidades tridimensionales. La técnica de poder asignar un *3D model mark* como simbología a una geometría simple de puntos, economiza enormemente los procesos de hardware. En este trabajo se ha comprobado que es la alternativa más ligera para capas con elevado número de entidades, sobre todo cuando se necesiten con carácter accesorio. Por ejemplo, solo la capa de unidades luminosas de Madrid contaba con más de 230.000 entidades y la capa de árboles sólo del ámbito de estudio eran casi 1200.

Esta menor carga computacional se debe a que la geometría de puntos reduce la cantidad de datos que deben procesarse en comparación con un modelo 3D completo, que puede tener una gran cantidad de vértices, caras y texturas. El renderizado es mucho menor al requerir menos procesamiento gráfico, ya que no necesitan cálculos de superficies, normales ni sombras complejas.

Sin embargo, esta técnica no asegura el control paramétrico de las dimensiones ni tampoco de la orientación de los objetos. La adecuación de la escala y la rotación de los objetos puede convertirse en una tarea manual ardua y poco precisa y por tanto, serán las necesidades del estudio o del proyecto las que determinen en qué casos se pueda aplicar la mejor técnica.

En la metodología CIM, no todos los modelos tridimensionales necesitan ser modelos BIM. Como se ha demostrado, estos pueden coexistir en el mismo entorno con otros tipos de modelos, incluso aquellos sin semántica o dimensiones paramétricas, contribuyendo todos ellos a una mayor comprensión del proyecto. Muchos de estos modelos presentan un grado de fidelidad a la realidad más esquemático y simple en cuanto a la definición de su geometría. Será cada estudio o proyecto el que determine qué técnica es la más adecuada según el tipo de datos que deba incorporar y el papel que estos datos desempeñarán en el proyecto.

Esta visión integral y detallada de la ciudad promueve que la gestión y la planificación urbana sea más eficiente. Estas maquetas virtuales, a futuro gemelos digitales en potencia, ayudan a mejorar la colaboración entre diferentes partes interesadas, incluyendo autoridades municipales, desarrolladores, arquitectos, ingenieros y la comunidad. El primer ejemplo de ello es la distribución gratuita y transparente de los datos abiertos sobre activos urbanos que ofrece el Ayuntamiento de Madrid. Primer paso para cualquier iniciativa CIM.

4. BIBLIOGRAFÍA

- Ayuntamiento de Madrid. (n.d.). IDEAM Web Geoportal. Recuperado el 27 de junio de 2024, de https://geoportal.madrid.es/IDEAM_WBGEOPORTAL/index.iam
- Dougherty, A. (2005). *Hurricane Katrina: Technology to the rescue*. AECbytes. <https://www.aecbytes.com/feature/2005/HurricaneTechHelp.html>
- Free3D. (n.d.). Free 3D Models - 3D Content Central. Retrieved June 27, 2024, from <https://free3d.com/>
- Harley, J. B., & Woodward, D. (Eds.). (1987). *The history of cartography, volume 1: Cartography in prehistoric, ancient, and medieval Europe and the Mediterranean*. Chicago, University of Chicago Press
- Jackson, M. J., & Woodsford, P. A. (1991). GIS data capture hardware and software. *Geographical Information Systems: Principles and Applications*, 1, 239-249.
- Naciones Unidas. (2015). *Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. https://www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/RES/70/1&Lang=S
- Naciones Unidas. (2023). *Informe sobre los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2023*. https://unsats.un.org/sdgs/report/2023/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2023_Spanish.pdf
- Sketchfab. (n.d.). 3D Models - Sketchfab. Retrieved June 27, 2024, from https://sketchfab.com/3d-models?date=week&features=downloadable&sort_by=-likeCount&cursor=bz0xJnA9Mjk%3D
- Sutherland, I. E. (1963). Sketchpad: A man-machine graphical communication system. *AFIPS '63 (Spring) Proceedings of the Spring Joint Computer Conference*, 329-346.
- Xu, X., Ding, L., Luo, H., & Ma, L. (2014). From Building Information Modeling to City Information Modeling. *Journal of Information Technology in Construction (ITCon)*, 19, 292-307. Retrieved from <http://eprints.hud.ac.uk/id/eprint/32840/>

Los SIG aplicados a las vistas paisajísticas realizadas durante la Guerra Civil en el frente norte de Aragón

S. Elía-García^{1,2}, R. Temes-Cordovez³, A. Ruiz-Varona¹

¹ AOS Research Group, Universidad San Jorge. Autovía A-23, Km. 299, 50830 Villanueva de Gállego (Zaragoza).

² Programa de doctorado "Arquitectura, edificación, patrimonio y ciudad", Universidad Politécnica de Valencia. Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia.

³ Departamento de Urbanismo, Universidad Politécnica de Valencia. Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia.

selia@usj.es, <https://orcid.org/0000-0002-5458-0536>

rtemesc@urb.upv.es, <https://orcid.org/0000-0002-5604-4892>

nruiz@usj.es, <https://orcid.org/0000-0001-8807-4917>

RESUMEN: La escasa cartografía existente en España al inicio de la Guerra Civil llevó a ambos bandos a producir material gráfico que sirviera de apoyo a la planificación bélica. La comunicación centra su atención en las vistas paisajísticas (croquis panorámicos y panoramas fotográficos) que realizaron especialistas del bando sublevado para fijar el conocimiento del territorio del frente norte de Aragón. Las 24 vistas paisajísticas contempladas y la localización de los 17 puntos de observación ofrecen una información que, gestionada a través sistemas de información geográfica (SIG), permite obtener un mapa de visibilidad revelador sobre el ámbito de estudio. Dado que el frente permaneció estable durante casi dos años, el análisis muestra las zonas del escenario de enfrentamiento que permanecían vistas u ocultas a ojos de las tropas en febrero de 1938, cuando se empezó a preparar la Batalla de Aragón, una gran ofensiva que llevaría a desplazar el frente a Cataluña.

Los resultados permiten estimar la precisión y calidad de las vistas paisajísticas, evaluar la conveniencia en la elección de los puntos de ruptura del frente, así como reforzar la idea de que el relieve condicionó los acontecimientos. A través del análisis de visibilidad se plasma la percepción del terreno de combate y se entienden mejor las decisiones tomadas en la planificación de una de las ofensivas más ambiciosas de la Guerra Civil española.

Palabras-clave: Guerra Civil Española, análisis de visibilidad, paisaje, croquis panorámicos.

1. INTRODUCCIÓN

Durante la Guerra Civil española, ante las carencias iniciales de ambos ejércitos, se trabajó intensamente para producir cartografía militar del campo de batalla. En este contexto son numerosas las vistas paisajísticas conservadas, considerando con este término tanto fotografías como croquis panorámicos (figura 1). Se trata de descripciones gráficas del terreno de combate tal y como se presentaba a ojos del observador, realizadas desde posiciones estratégicas para controlar el frente. Estas vistas fueron utilizadas como instrumento de conocimiento del territorio, el propio y el ajeno, aportando una impresión tridimensional concreta e inmediata que complementaba a la de mapas, planos, fotografías aéreas e informes escritos (Elía-García *et al.*, 2023). El elevado número de ejemplares existentes da idea de la relevancia militar que pudieron tener durante la guerra para la planificación estratégica y la toma de decisiones.

A los pocos días de estallar la Guerra Civil, el país quedó partido en dos y se conformaron unos frentes de guerra que recorrían el territorio delimitando dos Españas (Casanova, 2013). En Aragón, el frente se conformó enseguida como una línea serpenteante que cruzó la región de norte a sur dividiéndola en dos partes equivalentes, que se mantendrían sensiblemente equilibradas hasta marzo de 1938, momento en que una gran ofensiva del ejército sublevado trasladó la franja de contacto de ambas fuerzas hacia Cataluña (Maldonado, 2007). Que el frente se mantuviera estable durante tanto tiempo propició que las tropas realizaran vistas paisajísticas como parte del estudio del territorio ocupado por el enemigo.

La investigación propone realizar, a través de herramientas presentes en los SIG, un análisis de visibilidad del territorio que fue objeto de disputa, tomando como base los puntos de observación desde donde

se capturan las vistas paisajísticas, de tal forma que se genera un material con valor documental desde el que complementar el conocimiento sobre la crónica conocida de la Batalla de Aragón, la de mayor envergadura durante la Guerra Civil (Maldonado, 2007) y la que puso fin a la presencia del frente en tierras aragonesas.

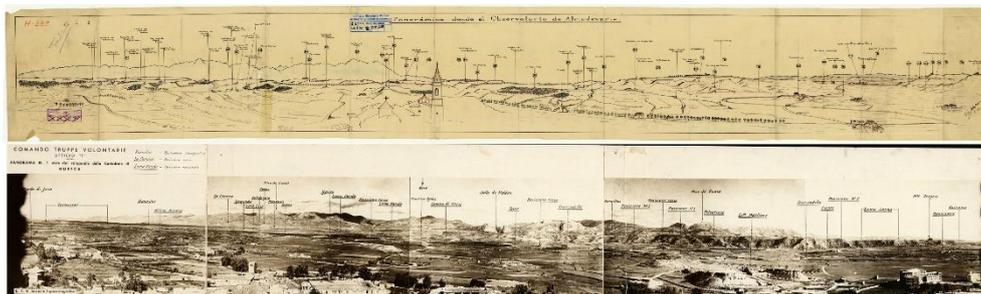


Figura 1. Muestra de dos vistas paisajísticas. Arriba: croquis panorámico desde el observatorio de Almodévar (SH05), Cuerpo de Ejército de Aragón, diciembre de 1937. Fuente: Archivo General Militar de Ávila. Abajo: panorama fotográfico desde el campanario de la catedral de Huesca (FSH1), *Comando Truppe Volontarie Ufficio "I"*, agosto de 1937 (fecha estimada por los autores). Fuente: Fondo Monés, Instituto Cartográfico y Geológico de Cataluña.

La localización de cada punto de observación ha sido fijada con exactitud gracias al trabajo de campo realizado, y que se corresponde con la extensión del territorio que ocupó el frente de Aragón entre las sierras pre-pirenaicas, al norte de la capital oscense, y el río Ebro, al sur de la ciudad de Zaragoza.

El manejo de las Tecnologías de Información Geográfica, en concreto la función de análisis de visibilidad de los SIG, es clave a la hora de, por un lado, evaluar la precisión del perfil del territorio y, por tanto, la calidad de las vistas paisajísticas estudiadas, que son tomadas como fuente primaria de la investigación, y, por otro lado, de evaluar la conveniencia en la elección de los puntos de ruptura del frente en las ofensivas, así como reforzar la idea de que el territorio condicionó lo sucedido.

2. CONTEXTO Y MATERIAL DE ESTUDIO

La investigación se centra en el entorno de las capitales aragonesas de Zaragoza y Huesca, abarcando un territorio contenido entre dos grandes barreras geográficas: al norte, un poderoso macizo montañoso cruza el horizonte de este a oeste anunciando la presencia de los Pirineos; y al sur, una vasta depresión del terreno surcada por el caudaloso Ebro separa drásticamente lo que sucede a un lado y otro del cauce del río. Entre ambos límites, la sierra de Alcubierre y la Hoya de Huesca caracterizan un paisaje repleto de matices que condicionan la manera en la que se habita y recorre.

El objetivo es encontrar conexiones entre la información extraída de las vistas paisajísticas y la planificación del ejército sublevado para romper el frente en diversos puntos simultáneamente durante la gran ofensiva de la Batalla de Aragón en marzo de 1938. Por esta razón, se ha considerado una selección de 24 vistas paisajísticas, las realizadas por el ejército sublevado en la zona de estudio.

Se parte de la premisa de que, en el ámbito de estudio, el frente de guerra se mantuvo estable desde su conformación en octubre de 1936 hasta su desplazamiento a Cataluña durante la Batalla de Aragón en marzo y abril de 1938 (Cenarro y Pardo, 2006). Sí que se produjeron oscilaciones en el trazado de las líneas de contacto entre los dos bandos, principalmente motivadas por los intentos del ejército republicano por acercarse a las ciudades de Zaragoza y Huesca, así como a las reacciones correspondientes del ejército sublevado (Martínez de Baños, 2008). No obstante, estas alteraciones fueron leves y no demasiado trascendentes, permitiendo sintetizar gráficamente el frente como una línea continua sobre el territorio.

En ese contexto, el ejército sublevado, con el apoyo de la sección cartográfica especialista del Comando de Tropas Voluntarias italianas (CTV), realizó las 24 vistas paisajísticas contempladas. Estas vistas fueron capturadas desde 17 puntos de observación situados muy cerca de la franja de combate y distribuidos de forma homogénea a lo largo de toda la línea de frente. Los croquis y panoramas se fueron dibujando o fotografiando en distintos momentos entre agosto de 1937 y marzo de 1938. Sin embargo, al retratar el paisaje de un frente de guerra invariable, la información gráfica acumulada en el conjunto de las vistas durante esos meses permite interpretar la visibilidad del territorio desde el campo de batalla que tenía el ejército sublevado en febrero de 1938, cuando empezó a preparar la gran ofensiva que le llevaría a alcanzar el mar Mediterráneo el 15 de abril de 1938, la Batalla de Aragón (Maldonado, 2007). En este supuesto se basa el desarrollo de la comunicación.

El frente de guerra se mantuvo sensiblemente estable durante el mismo tiempo en la totalidad del

territorio aragonés. Las fluctuaciones puntuales de la línea de frente al sur del Ebro se produjeron en relación con las tentativas del ejército republicano por llegar a Zaragoza atacando por Quinto de Ebro y Belchite en agosto de 1937 (Aparicio Cámara, 2008), y por hacerse con el control de la ciudad de Teruel, objetivo que cumplirían en diciembre de 1937 (Solano Sanmiguel, 2008). La ofensiva republicana sobre la capital turolense provocó que Franco reaccionara ordenando desplazar a Teruel a una parte considerable de las tropas que estaban luchando en Madrid, lo que finalmente dio su fruto al recuperar la ciudad el 22 de febrero de 1938 (Maldonado, 2007).

Una vez cumplido el objetivo de reconquistar la ciudad de Teruel, los dirigentes sublevados optaron por aprovechar el elevado número de efectivos desplazados a la zona y proyectaron una gran ofensiva destinada a romper el frente de Aragón a lo largo de toda su longitud, desde los Pirineos hasta las sierras turolenses, en varios puntos y en un plazo muy corto de tiempo (Maldonado, 2007). Para llevar a cabo una operación de tal envergadura, las fuerzas sublevadas se organizaron equilibradamente a lo largo de la franja de contacto y se seleccionaron adecuadamente los puntos de ruptura mediante una estudiada planificación previa.

La Batalla de Aragón se inició el 9 de marzo de 1938 con ataques simultáneos en varios puntos del frente en la región de Teruel (Solano Sanmiguel, 2008). La operación tuvo éxito desde el principio, y el ejército republicano comenzó a ceder terreno, desplazándose hacia el este de la península. Después de dos semanas de avance del bando sublevado en el frente sur de Aragón comenzaron las hostilidades en el frente norte, la zona y el periodo objeto de estudio en esta comunicación.

3. ANÁLISIS DE VISIBILIDAD

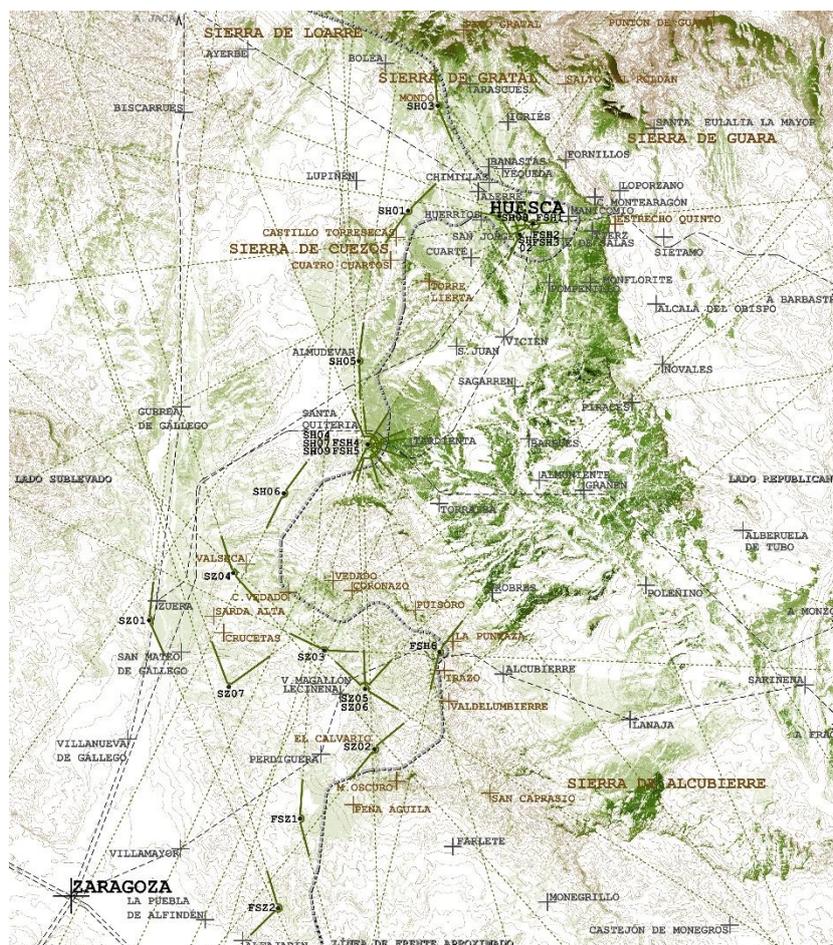


Figura 2. Análisis de visibilidad obtenido a partir de las vistas paisajísticas, se indica para cada una de las 24 vistas el arco de visión. Fuente: elaboración propia.

El análisis de visibilidad es una herramienta conocida de los SIG (Temes-Cordovez y Moya Fuero, 2020) y comúnmente aplicada a los estudios sobre el territorio (Ruiz-Varona y Temes-Cordovez, 2018). Ahora bien, la novedad de la investigación reside en el análisis de todos los puntos de observación desde los que se realizaron las vistas paisajísticas, y la posibilidad de conocer cuál es la superficie total del territorio controlada

visualmente. Para realizar este estudio, en primer lugar, se ha generado un modelo digital del terreno (MDT) tomando como fuente la información proporcionada por la Infraestructura de Conocimiento Espacial de Aragón, obteniendo como salida una imagen ráster con un paso de malla de cinco metros. A través del software QGIS se caracterizan los puntos de vista (*viewpoint*) incluyendo los parámetros de ángulo de visión (acimut) inicial y final —obtenido del análisis de las vistas paisajísticas— y considerando una altura de vista humana estándar de 1,6 metros y una profundidad de visión de 50 kilómetros —este alcance es equivalente al que se precisa en los análisis militares detallados del paisaje—. Los resultados individuales de cada uno de los puntos de observación del análisis de visibilidad (*viewshed*) son superpuestos (*combine multiple output*), obteniendo una imagen ráster con un valor por píxel equivalente al número de veces que ese sector del territorio es visible (desde el lado sublevado) por cada una de las 24 vistas paisajísticas (figura 2). Esta cartografía generada proporciona una base sólida para entender las ventajas y limitaciones visuales que disponían las fuerzas sublevadas en el terreno. Sin duda, esta información tuvo que influir en la planificación táctica y la toma de decisiones, ya que las áreas visibles evidencian los sectores donde se podían proyectar ataques efectivos, mientras que las áreas no visibles podrían haber ofrecido refugio o rutas de movimiento ocultas para las fuerzas enemigas.

La capacidad de identificar estos detalles a través de herramientas SIG y la superposición de visibilidades individuales son una demostración de cómo las tecnologías actuales pueden ayudar a analizar y reinterpretar acontecimientos históricos desde una óptica distinta. Este enfoque también subraya la importancia que tenían los croquis panorámicos y los panoramas fotográficos y justifica su uso en contextos bélicos del pasado. Además, en este caso, puede proporcionar una comprensión más completa de los movimientos realizados y las estrategias empleadas, en este caso por el bando sublevado, durante la Batalla de Aragón.

4. RESULTADOS Y SU APLICACIÓN A LA CRÓNICA DE LA BATALLA DE ARAGÓN

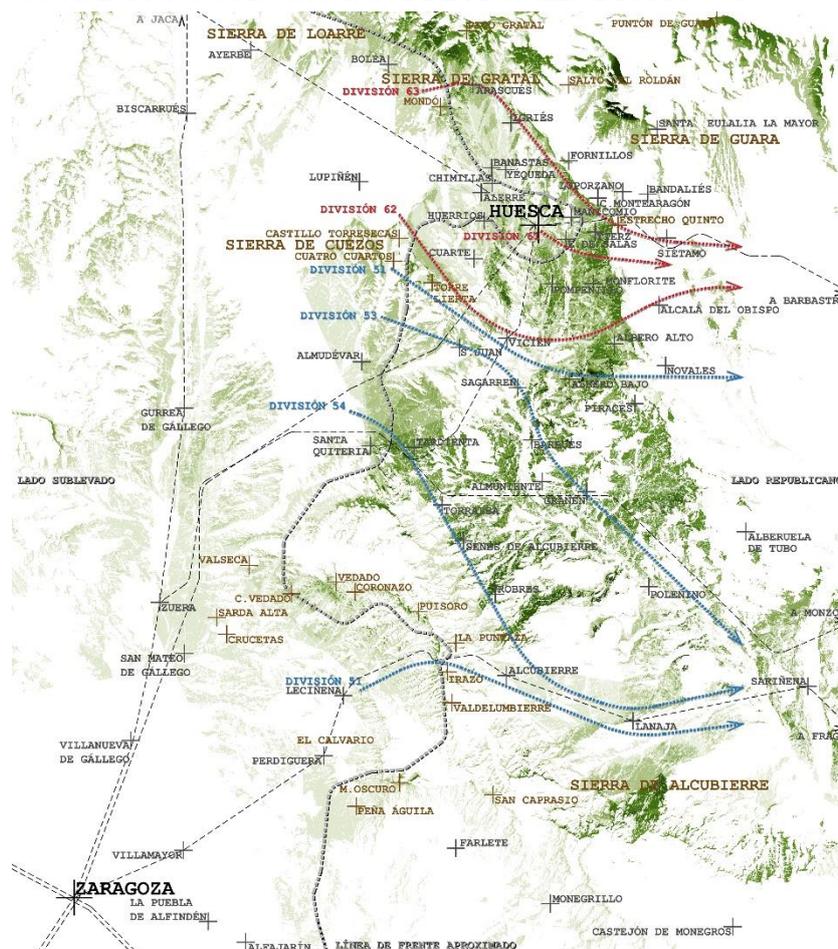


Figura 3. Sobre el análisis de visibilidad se han trazado las trayectorias de las tropas en la batalla de Aragón, en rojo el Cuerpo de Ejército de Navarra, en azul el cuerpo de Ejército de Aragón. Fuente: elaboración propia.

La figura 3 ofrece un mapa que muestra las áreas visibles y ocultas para el ejército sublevado desde el

terreno en el momento en el que decidió planificar la Batalla de Aragón. En la imagen se destaca la importancia de dos formaciones montañosas, oblicuas en el mapa y paralelas entre sí, situadas al este de cada capital: la sierra de Alcubierre, que limitó la percepción visual del ejército sublevado frente a Zaragoza; y el conjunto de lomas continuas que, partiendo de la sierra de Gratal y cruzando el territorio hacia el sur, bloquearon la visibilidad hacia el este desde Huesca. El reto para el bando dirigido por Franco en la Batalla de Aragón fue planificar los movimientos para sobrepasar estas dos grandes fronteras naturales que ocultaban la retaguardia republicana.

La gran ofensiva se activó en el tramo al norte del río Ebro el 22 de marzo de 1938 (Arcaza, 2008). Las tropas sublevadas se organizaron con el Cuerpo de Ejército de Navarra preparado para abordar la franja de contacto más al norte, abarcando los Pirineos y el cerco de Huesca, y con el Cuerpo de Ejército de Aragón en continuidad hacia el sur, extendiéndose hasta englobar la sierra de Alcubierre. En la figura 3 se indican además las trayectorias seguidas por las distintas divisiones de cada cuerpo de ejército.

En el cerco de Huesca, las divisiones 63 y 62 avanzaron al mismo tiempo para romper el frente al norte y al sur de la capital oscense. Por el norte, la División 63 atacó las faldas de las sierras de Loarre y Gratal, logrando superarla con efectividad a pesar de una tenaz resistencia (Arcaza, 2008). Este movimiento pudo ser perfectamente planificado a través de las vistas paisajísticas, ya que se conocieron con antelación las características del territorio sobre el que se pretendía progresar. El croquis panorámico SH03 (figura 4) fue dibujado desde la posición del Mondó, un monte no demasiado alto pero que destacaba en su contexto inmediato y constituía un buen observatorio. La visibilidad que el croquis aporta al análisis justifica los movimientos del primer día de ofensiva descritos en los libros de historia. El dibujo y las acciones narradas en la crónica coinciden en la fecha de realización, marzo de 1938, en la autoría, el Cuerpo de Ejército de Navarra, así como en el paisaje representado y recorrido: la ladera sur de la sierra de Gratal. La panorámica se compuso con la localidad de Arascués en el centro de la perspectiva, meta de la primera etapa del avance por el norte de la capital, y se marcaron en ella las ubicaciones de las defensas republicanas que la rodeaban y que tuvieron que ser vencidas para cumplir el objetivo.

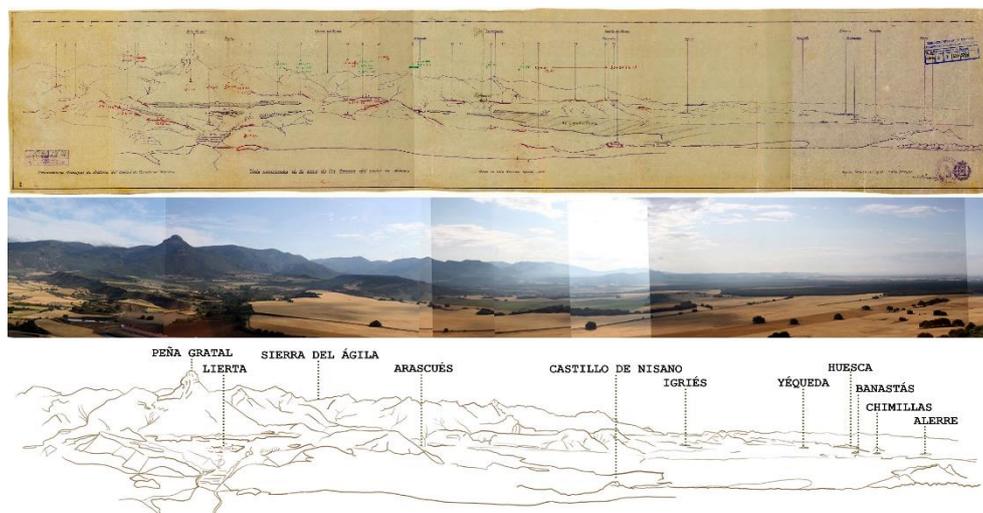


Figura 4. Arriba: SH03, croquis panorámico de la zona de las Coronas del sector Huesca, Cuerpo de Ejército de Navarra, marzo de 1938. Fuente: Archivo General Militar de Ávila. Abajo: panorámica fotográfica actual tomada desde el mismo punto de observación y síntesis gráfica indicando los elementos del paisaje destacados en el dibujo. Fuente: elaboración propia.

Al llegar a Arascués, la División 63 cambió de rumbo y, condicionada por el relieve, continuó progresando hacia el sur en dirección a Estrecho Quinto (Maldonado, 2007). Avanzó a lo largo del perfil de las lomas que cierran el este de Huesca, hasta situarse junto a la carretera de Barbastro, la salida natural de la Hoya hacia Cataluña. El análisis marca claramente en la cumbre de este conjunto de elevaciones el límite de lo visible para el ejército sublevado. No pudo ser casualidad que la trayectoria seguida en su avance atravesara el territorio que habían controlado ópticamente durante el tiempo que duró el cerco.

De manera equivalente por el sur de la capital, la División 62 apoyó su marcha en el relieve de la sierra de Cuezos (Arcaza, 2008). En la figura 3 se aprecia una mancha de color más intenso en la vertiente norte de la sierra, franja de territorio por la que se desplazó la división. La sierra de Cuezos pudo ser analizada desde las posiciones sublevadas durante la planificación del ataque, guiando a las tropas hasta alcanzar la

localidad de Vicien y progresar superando el límite de lo visible hasta unirse con la División 63 (Maldonado, 2007). Una vez que se culminó la maniobra de envolver a la capital oscense y desbordar la línea de frente que la cercaba, la División 61 partió desde la propia ciudad para atacar y ocupar las posiciones republicanas que habían quedado aisladas en el interior de la Hoya de Huesca (Arcarazo, 2008).

Para deshacer el frente que se mantenía fuertemente aferrado al otro gran obstáculo natural de la zona, la sierra de Alcubierre, el Cuerpo de Ejército de Aragón movilizó a sus divisiones siguiendo trayectorias coherentes con la información que arroja el análisis de visibilidad. En la figura 3 se evidencia que el ejército sublevado disponía de poca información sobre la vertiente oriental de la sierra, ya que se mantuvo oculta a sus observadores. La disposición de las fuerzas a un lado y otro de las cumbres de la sierra, con un relieve complejo que dificultaba los movimientos y favorecía el estancamiento, complicaba las opciones de ruptura del frente mediante ofensivas directas en la zona alta de las montañas.

Sin embargo, las manchas de color de la imagen indican que desde posiciones sublevadas situadas más al norte sí que se pudo divisar el territorio de retaguardia republicana en continuidad con el volumen oculto de la sierra de Alcubierre. Con el conocimiento adquirido desde esos emplazamientos, fue posible una planificación previa más precisa, y desde allí se iniciaron las acciones que culminaron con la desaparición del enfrentamiento en la sierra y el repliegue del bando republicano. Estas acciones fueron llevadas a cabo por el Cuerpo de Ejército de Aragón, que se organizó con cuatro divisiones. Tres de ellas, la 51, 53 y 54, partieron desde las estribaciones del norte de la sierra, mientras que solo una, la 55, afrontó el reto de sobrepasar la cordillera directamente, cruzando el puerto de Alcubierre (Maldonado, 2007). La visibilidad del territorio propició una estrategia similar a la del Cuerpo de Ejército de Navarra para envolver Huesca y aislar las posiciones republicanas próximas a la ciudad. En este caso, se rodearon las posiciones republicanas de la sierra al ocupar las poblaciones clave de su retaguardia, debilitándolas antes de atacar frontalmente.

En el mapa de visibilidad se aprecia que estas rutas pudieron ser planificadas desde la distancia y que el conocimiento del territorio que se adquirió desde los observatorios de Almudévar y Santa Quiteria sirvió para apoyar los movimientos. Entre las vistas paisajísticas consideradas, destaca el croquis panorámico SH09 (figura 5), dibujado desde la posición de la ermita de Santa Quiteria por una sección especializada perteneciente al Cuerpo de Ejército de Aragón, responsable del ataque a este sector. Este croquis no solo formó parte de la planificación de la ofensiva, sino que también jugó un papel crucial en ella. Varios indicios lo sugieren: la fecha en la que se firmó, 19 de marzo de 1938, tres días antes del inicio del ataque; el paisaje retratado, abarcando toda la extensión del campo de batalla donde se desarrollaron las operaciones; y la profesionalidad con la que fue ejecutado. La acertada síntesis gráfica con la que se dibujó se acompañó de numerosas y ordenadas anotaciones, así como de un mapa topográfico sobre el que se marcó la ubicación de trincheras y fortificaciones enemigas. Todo ello ilustra y justifica que la gestión y planificación previa de la Batalla de Aragón sea considerada como una de las más relevantes de la Guerra Civil (Maldonado, 2007).

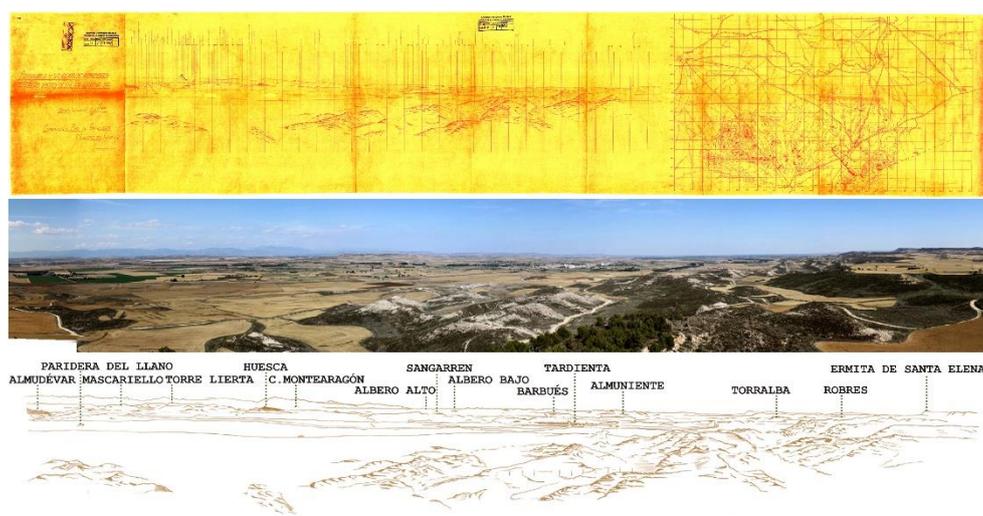


Figura 5. Arriba: SH09, croquis panorámico desde Santa Quiteria, Cuerpo de Ejército de Aragón, marzo de 1938. Fuente: Archivo General Militar de Ávila. Abajo: panorámica fotográfica actual tomada desde el mismo punto de observación y síntesis gráfica indicando los elementos del paisaje destacados en el dibujo. Fuente: elaboración propia.

De esta manera, las tres divisiones del Cuerpo de Ejército de Aragón se apoderaron del territorio de la

retaguardia republicana y alcanzaron la carretera que conectaba Zaragoza con Sariñena, una vía de comunicación crucial para el pretendido avance hacia Cataluña. Al mismo tiempo, la División 55 abrió una brecha desde Leciñena (Arcarazo, 2008) y atacó el puerto de Alcubierre, cumpliendo el objetivo de superar las defensas que durante tantos meses habían conformado el frente en la sierra de Alcubierre.

5. CONCLUSIONES

El análisis de visibilidad realizado a través de herramientas SIG demuestra que las vistas paisajísticas realizadas en el contexto de la Batalla de Aragón fueron un ejercicio fundamental para obtener el conocimiento necesario del territorio, sobre todo desde la perspectiva de una acertada planificación de la operación militar a gran escala. A partir de la información proporcionada por estas vistas, así como la contenida en otros registros gráficos y escritos, se seleccionaron los lugares precisos para romper el frente y se determinaron los itinerarios más adecuados para adentrarse en el territorio republicano.

Una vez superadas las barreras naturales de la Hoya de Huesca y las montañas de la sierra de Alcubierre, el conjunto de las fuerzas sublevadas continuó su avance hacia el este peninsular, deshaciendo en pocos días la configuración que durante dos años había mantenido la línea del frente en el norte de Aragón. Hoy, gracias al uso de modelos y SIG de gran precisión podemos comprobar y demostrar cómo las decisiones tomadas en la planificación de una de las ofensivas más ambiciosas de la Guerra Civil española fueron coherentes con la percepción del relieve que tuvieron los combatientes.

La investigación presentada ha permitido contrastar registros gráficos realizados con técnicas pertenecientes a épocas muy distantes en el tiempo y, como resultado, se han encontrado conexiones entre las nuevas herramientas fundadas en las tecnologías de la información geográfica y las antiguas fotografías y dibujos a mano. Ambos tipos de documentos ofrecen información complementaria entre sí en la que se destaca la influencia que la orografía tuvo en el trazado de la línea del frente de guerra y en la evolución de los acontecimientos bélicos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Departamento de Ciencia, Universidad y Sociedad del Conocimiento, del Gobierno de Aragón, España (S04_23R).

6. BIBLIOGRAFÍA

- Aparicio Cámara, A. (2008): "La gran ofensiva republicana sobre Zaragoza. Batalla de Belchite". En F. Martínez de Baños (Ed.), *Guerra Civil Aragón Tomo I* (pp. 263–298). Zaragoza, Delsan.
- Arcarazo, L. (2008): "El Sector Huesca del Frente de Aragón. Los combates entre 1936 y 1938". En F. Martínez de Baños (Ed.), *Guerra Civil Aragón Tomo I* (pp. 95–188). Zaragoza, Delsan.
- Casanova, J. (2013). *España partida en dos: breve historia de la Guerra Civil española*. Madrid, Grupo Planeta.
- Cenarro, Á., y Pardo, V. (2006). *Guerra Civil en Aragón 70 años después*. Zaragoza, Gobierno de Aragón.
- Elía-García, S., Ruiz-Varona, A., y Temes-Cordovez, R. (2023). Líneas en el frente. El dibujo como arma durante la Guerra Civil Española en Aragón. *EGA Revista de Expresión Gráfica Arquitectónica*, 28(49), 120–137. <https://doi.org/10.4995/ega.2023.19410>
- Maldonado, J. M. (2007). *El Frente de Aragón. La Guerra Civil en Aragón (1936-1938)*. Zaragoza, Mira editores.
- Martínez de Baños, F. (2008). *Guerra Civil Aragón I*. Zaragoza, Delsan Libros SL.
- Ruiz-Varona, A., y Temes-Cordovez, R. R. (2018). La evolución del paisaje a través de TIG. El caso de la comarca de los Monegros, Zaragoza. En *Tecnologías de la información geográfica: perspectivas multidisciplinares en la sociedad del conocimiento*. 360-367. Universidad de Valencia.
- Solano Sanmiguel, V. (2008): "La Guerra Civil en Teruel". En F. Martínez de Baños (Ed.), *Guerra Civil Aragón Tomo I* (pp. 297–330). Zaragoza, Delsan.
- Temes-Cordovez, R., y Moya Fuero, A. (2020). *SIG revolution: ordenación del territorio, urbanismo y paisaje*. Madrid, Síntesis. <http://catalogo.rebiun.org/rebiun/record/Rebiun26422857>

Creación de imágenes sintéticas en el IRoc en imágenes Sentinel-2: estudio preliminar en cubiertas del suelo de diferentes zonas mundiales

N. Cartes¹, X. Pons¹

¹ Grumets Research Group, Departament de Geografia. Edifici B, Universitat Autònoma de Barcelona, 08193 (Bellaterra, Barcelona), Catalonia, Spain

nuria.cartes@uab.cat, <https://orcid.org/0000-0002-8040-7104>

xavier.pons@uab.cat, <https://orcid.org/0000-0002-6924-1641>

RESUMEN: En la última década, el incremento de la utilización *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) o drones, equipados con sensores multiespectrales en sinergia con las imágenes de satélite, y en concreto de la constelación Sentinel-2, ofrece nuevas posibilidades de conocimiento, planificación y gestión del territorio, tal como demuestran numerosos estudios. Sin embargo, la sensibilidad espectral de las cámaras multiespectrales de los UAS suele limitarse al espectro visible (VIS) y, a lo sumo, infrarrojo cercano (IRc). En términos generales, esto se debe al mayor coste económico y complejidad técnica de los sensores capaces de captar datos en la región espectral del infrarrojo de onda corta (IRoc) u otras longitudes de onda. En cambio, los sensores *MultiSpectral Instrument* (MSI) en Sentinel-2, o *Operational Land Imager* (OLI) en Landsat, adquieren datos en las regiones VIS, IRc e IRoc. A fin de superar la falta de datos en el IRoc en las imágenes de los UAS, este estudio propone un método para su estimación. Este trabajo demuestra, de manera preliminar, que se pueden generar las bandas sintéticas del IRoc a partir de las otras regiones espectrales con un nivel aceptable de exactitud mediante la correlación lineal múltiple, y que dicha fiabilidad es extensiva a diversos tipos de cubiertas, pareciendo extrapolable a otras fechas de la misma o de otras regiones del mundo.

Palabras-clave: Sentinel-2, generación de imágenes sintéticas, infrarrojo de onda corta, UAV.

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Durante los últimos años, la utilización de imágenes multiespectrales captadas por sensores equipados en vehículos aéreos no tripulados (UAV, por sus siglas en inglés, o drones) en sinergia con las imágenes de satélite ha experimentado un auge importante (Alvarez-Vanhard et al., 2021). Podemos encontrar ejemplos de su aplicación en el sector forestal, el agrícola, la generación de mapas de cubiertas del suelo o la corrección radiométrica de imágenes de teledetección (Aleman-Montes et al., 2023; Dainelli et al., 2021; Padró et al., 2018; Phiri et al., 2020)

En nuestro trabajo anterior (Cartes y Pons, 2022) ya expusimos nuestras consideraciones acerca de la rara disponibilidad de imágenes en el infrarrojo de onda corta (IRoc) en los sensores de UAV, y el hecho que ello limita la aplicación sinérgica de las imágenes de UAV y las imágenes de satélite, que tan prometedora resulta. En la presente contribución nuestro objetivo es saber si es posible la creación de imágenes sintéticas en el IRoc en imágenes Sentinel-2 (S-2 en adelante) del programa espacial Copernicus de la European Space Agency (ESA) como paso previo a la generación de imágenes sintéticas en la misma región espectral en sensores de UAV, de manera que las aludidas sinergias entre ambos tipos de sensores puedan utilizarse a pesar de la falta de dicha región espectral en estos últimos instrumentos. Pero en este caso el estudio aborda ya una visión más aplicada, pretendiendo tener unos primeros resultados sobre su nivel de fiabilidad real, así como sobre la posibilidad de extrapolar el método a otras cubiertas, fechas y zonas mundiales.

2. MATERIAL Y ÁREA DE ESTUDIO

Se han seleccionado imágenes multiespectrales del sensor *MultiSpectral Instrument* (MSI) de la constelación S-2. Con estas imágenes se estudia la posibilidad de generar imágenes sintéticas en el IRoc (1500 nm – 2400 nm) a partir de la relación de la información captada en estas bandas con la que se encuentra en las

bandas del visible e infrarrojo cercano, VIS-IRc (400 nm – 900 nm). En concreto, se han utilizado los productos oficiales (Colección 1, disponibles en Copernicus Data Space Ecosystem) de S-2 de la ESA de nivel 2A de procesado, los cuales proporcionan datos de reflectancia en superficie ($R \cdot 10\,000$). Por lo que respecta a la resolución espacial, estos productos ofrecen las bandas 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, y 8A (VIS-IRc) y las bandas 11 (IROC-1) y 12 (IROC-2) a 60 m, las bandas del VIS-IRc, excepto la banda 1, y del IROC a 20 m y las bandas 2, 3, 4 y 8 a 10 m con un error de geolocalización absoluta menor a 12 m. Por lo que respecta a la resolución radiométrica del MSI, es de 12 bits y con una exactitud del 5 % en reflectancia (Gascon et al., 2017).

Las zonas de estudio se sitúan en Cataluña, en Chile (Región de Ñuble) y en EE. UU. (California). En Cataluña se han analizado 71 imágenes, y en Chile y EE. UU. una en cada región. Además, en el análisis se han incluido mapas de cubiertas suelo de cada zona, prácticamente coetáneos con las imágenes de teledetección (Commission for Environmental Cooperation (CEC), 2023; González-Guerrero y Pons, 2020; Zhao et al., 2016). Las Figuras 1, 2 y 3 muestran las teselas MSI utilizadas, así como los correspondientes mapas de cubiertas del suelo. En el caso de Cataluña las imágenes para este estudio fueron adquiridas entre marzo y septiembre del 2017. En el caso de Chile la imagen seleccionada fue adquirida el 05-03-2016, y en el caso de EE. UU. fue del 23-08-2019.

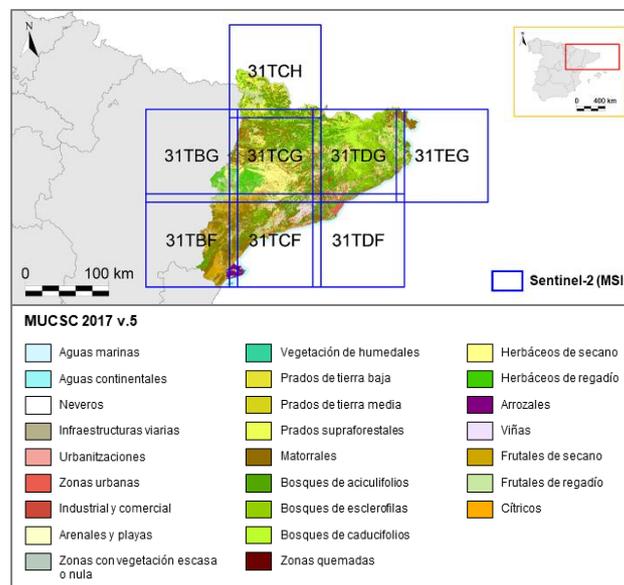


Figura 19. Teselas (azul) de las imágenes de S-2 en Cataluña y Mapa de Usos y Cubiertas de Cataluña (2017 v5.).

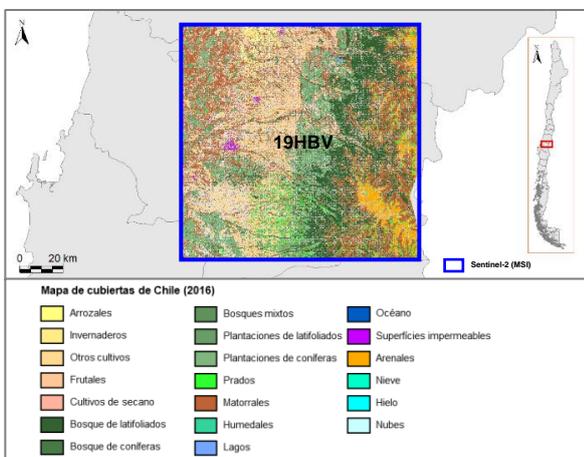


Figura 20. Tesela (azul) de la imagen de S-2 en Chile y Mapa de cubiertas de Chile (2016).

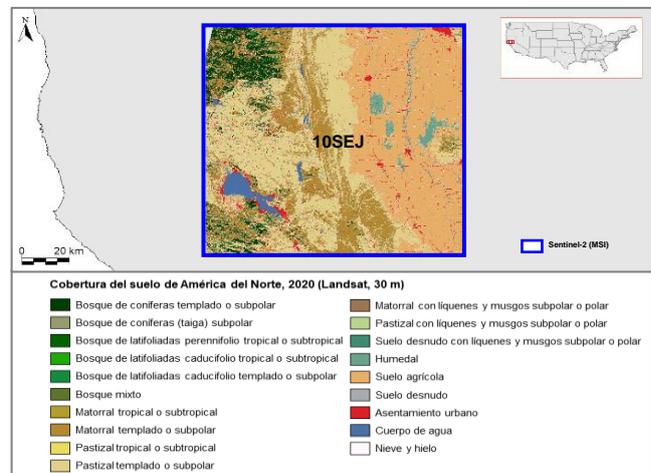


Figura 3. Tesela (azul) de la imagen de S-2 en EE. UU. y Mapa de cubiertas de América del Norte (2020).

3. MÉTODOS

El estudio de la correlación de las bandas del VIS y del IRc respecto de la banda IRoc-1 de las imágenes de S-2 en función de los distintos tipos de cubiertas se ha realizado en cinco fases: 1/ cálculo de la regresión lineal múltiple (RLM) de las 71 imágenes de Cataluña (como un todo estadístico), 2/ generación de las bandas sintéticas IRoc-1 correspondientes a cada imagen y la determinación de su similitud con la banda IRoc-1 original en base al RMSE, 3/ variabilidad de dicha similitud en relación a los tipos de cubiertas del suelo, 4/ generación de la banda sintética IRoc-1 en las imágenes de Chile y EE. UU. a partir de la RLM obtenida en Cataluña y determinación de su similitud, y 5/ evaluación de la variabilidad de la similitud en relación a los tipos de cubiertas correspondientes a la zona de Chile y de EE. UU., respectivamente (Figura 3). Todas las imágenes se han preprocesado para enmascarar el agua, la nieve, el hielo, las nubes, las autosombras y las sombras proyectadas a fin de reducir las incoherencias o imprecisiones introducidas por dichos factores.

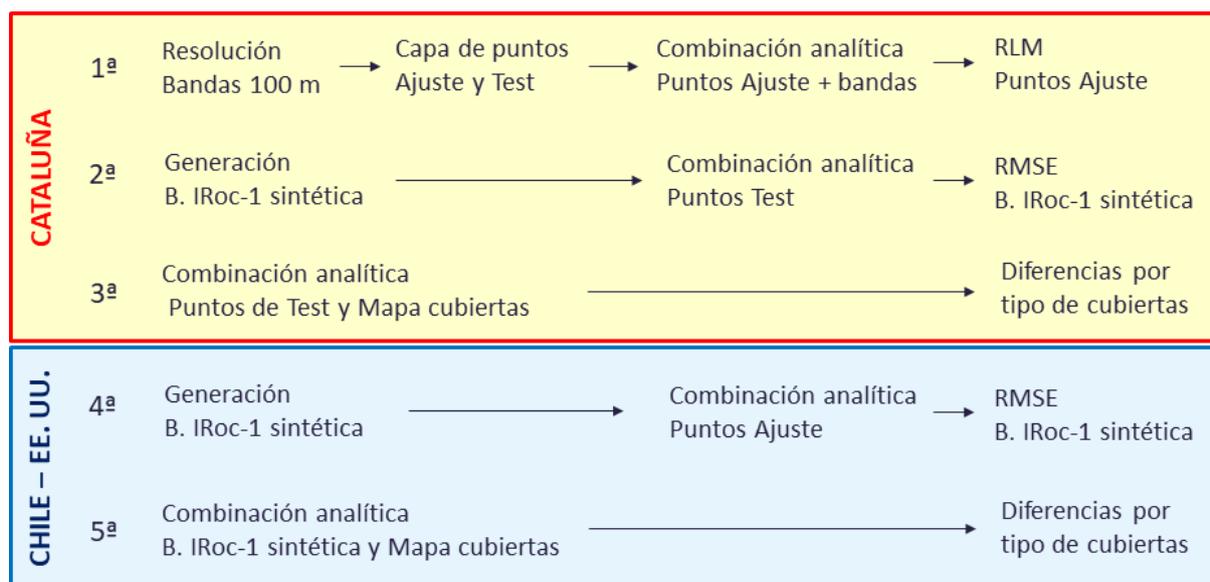


Figura 21. Esquema del método de análisis de la correlación entre las bandas del VIS-IRc y del IRoc-1 en relación a los tipos de cubiertas en diversas zonas del mundo.

3.1. RLM en Cataluña

Se han utilizado las bandas 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 8a, para el VIS-IRc, y la banda 11 (IRoc-1). Para trabajar con todas las bandas a la misma resolución, primero se ha contraído la banda 8 de 10 m a 20 m, usando la media y, después, se han contraído todas de 20 m a 100 m (seleccionando el valor central), para la obtención de la mejor radiometría posible a partir de los datos descargados y reducir el tiempo de procesado [módulos [DensRas](#) y [CanviRes](#) de [MiraMon](#) (Pons, 2024)]. Para cada una de las 8 teselas, se ha generado una capa de puntos mediante la vectorización de una banda a 100 m de una imagen [módulo [IMGPNP](#)]. En cada capa de puntos, se ha seleccionado aleatoriamente el 70 % del total para generar la capa de ajuste y el 30 % restante para la capa de test. *A posteriori*, se ha ejecutado una combinación analítica de las 71 imágenes con las capas de puntos de ajuste y de test [módulo [CombiCap](#)]. De esta manera se ha obtenido una tabla DBF con los valores del píxel de cada banda en cada punto para cada imagen. Después se han unido las 71 DBF de los puntos de ajuste en una única DBF [módulo [GestBD](#)]. En esta tabla DBF única se ha realizado la RLM de las bandas VIS-IRc respecto de la banda IRoc-1 con el fin de obtener el coeficiente de correlación (R), el de determinación (R^2), el *Root Mean Square Error* (RMSE) y los coeficientes de las variables explicativas; el nivel de significación utilizado ha sido del 95 % (alfa=0.05) [módulo [MiraD](#)].

3.2. Generación de las bandas sintéticas IRoc-1 en Cataluña

Para cada una de las 71 imágenes, se han calculado las bandas sintéticas IRoc-1 a partir de coeficientes de las variables explicativas definidos por la RLM del conjunto de todas ellas. A continuación se ha ejecutado la combinación analítica de los puntos de test con las bandas sintéticas, con lo que en las tablas DBF de las capas de los puntos de test se ha podido realizar la resta entre los valores de las bandas sintéticas de los valores de bandas IRoc-1 originales para validar la exactitud del ajuste con el cálculo del RMSE del conjunto de las 71 imágenes.

3.3. Exactitud de la banda sintética IRoc-1 por tipos de cubierta en Cataluña

La determinación del acierto de la banda sintética IRoc-1 por tipo de cubierta se ha realizado utilizando las capas de puntos de test de la fase anterior, pues sus tablas DBF ya contienen el campo relativo a la resta entre la banda sintética y la original. En primer lugar dichas capas se han combinado analíticamente con el Mapa de Cubiertas, después se ha realizado la selección de los puntos según el tipo de cubierta y se ha calculado el RMSE de cada subconjunto de puntos.

3.4. Generación de las bandas sintéticas en Chile y EE. UU.

Esta fase empieza por la unificación de la resolución espacial a 20 m y a 100 m de las bandas 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 8a, para el VIS-IRc, y la banda 11 (IRoc-1), la generación de las capas de puntos de ajuste y de test y la combinación analítica de las capas de puntos con las bandas indicadas siguiendo un procedimiento similar al descrito en la 1ª fase, tanto para la imagen de Chile como para la de EE. UU. Aquí, la banda sintética IRoc-1 de la imagen de cada zona se ha calculado a partir de coeficientes de las variables explicativas definidos por la RLM de la 1ª fase, es decir, de la calculada para la zona de Cataluña. En este caso se ha combinado analíticamente la capa de puntos de ajuste con la banda sintética, para luego, en la tabla DBF, determinar la exactitud de la estimación mediante el cálculo del RMSE.

3.5. Exactitud de la banda sintética IRoc-1 por tipos de cubierta en Chile y EE. UU

En cada imagen, la capa de puntos de ajuste de la fase anterior se ha combinado analíticamente con el mapa de cubiertas correspondiente, Mapa de Cubiertas Chile, 2016 (30 m) y Cubiertas del suelo de América del Norte, 2020 (Landsat, 30 m) para la imagen de EE. UU. A continuación se han seleccionado los puntos según el tipo de cubierta y se ha calculado el RMSE de cada subconjunto de puntos.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los principales resultados del análisis de la correlación de las bandas VIS-IRc respecto a la banda IRoc-1 en imágenes de S-2 nivel 2 en % de reflectancia en superficie son:

En la regresión lineal múltiple realizada en las imágenes de Cataluña en la 1ª fase, el valor de correlación (R) asciende al 0.96 y el coeficiente de determinación (R²) al 0.93, ambos muy elevados a pesar del gran número (y, por tanto, gran diversidad radiométrica) de fechas utilizadas.

En cuanto al acierto de las estimaciones analizadas en la 2ª y 4ª fase, el RMSE en las tres zonas es próximo a 3 (en % de reflectancia en superficie) (Tabla 1).

Tabla 1. Acierto de la banda sintética IRoc-1 en RMSE en % de reflectancia en superficie para las tres zonas estudiadas.

	<i>Cataluña</i>	<i>Chile</i>	<i>EE. UU.</i>
RMSE (R (%) en superficie)	2.83	3.15	3.05

En cuanto a la estimación de la similitud de la imagen sintética en función de los tipos de cubierta, el estudio propuesto en las fases 3ª y 5ª muestra que el RMSE de las cubiertas (excluyendo aquellas con una presencia menor al 1%) se mantiene por debajo de 4 (en % de reflectancia en superficie) para casi todas las cubiertas de todas las zonas (Figura 5, Figura 6 y Figura 7).

Nótese que los errores son relativamente bajos en prácticamente todas las cubiertas, y que el comportamiento es estable entre zonas, lo cual sugiere robustez de los resultados obtenidos.

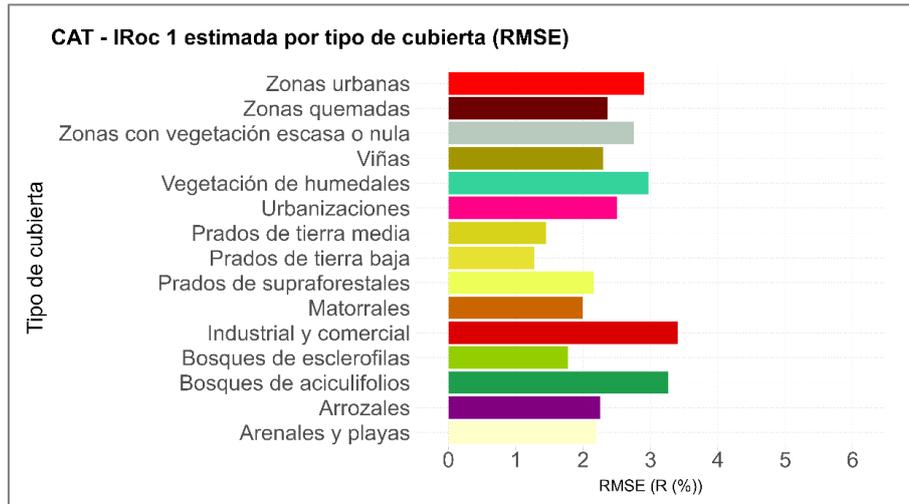


Figura 5. Error de la banda sintética IRoc-1 en % de reflectancia en superficie según el tipo de cubierta para el conjunto de imágenes analizadas en Cataluña.

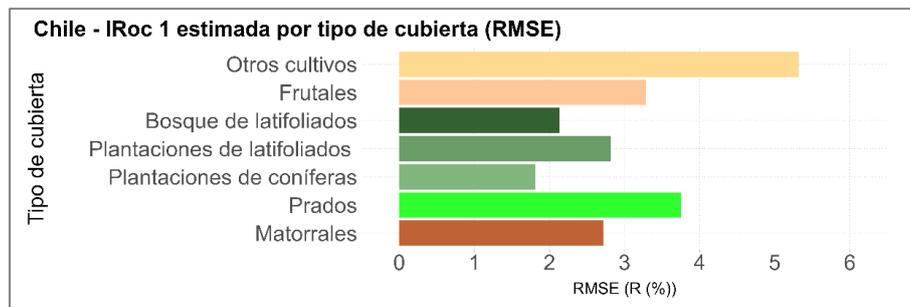


Figura 6. Error de la banda sintética IRoc-1 en % de reflectancia en superficie según el tipo de cubierta para la imagen analizada en Chile.

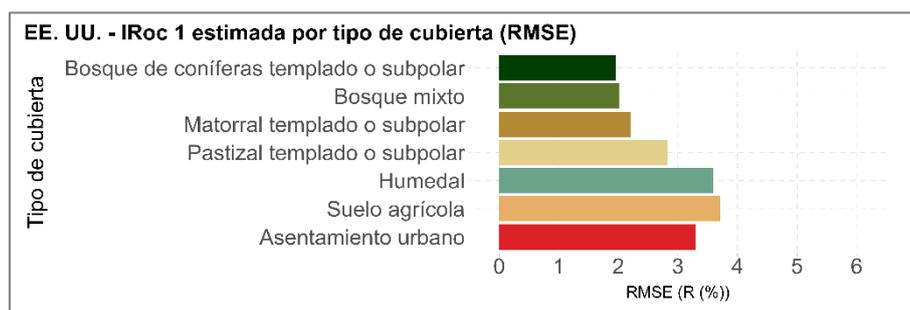


Figura 7. Error de la banda sintética IRoc-1 en % de reflectancia en superficie según el tipo de cubierta para la imagen analizada en EE. UU.

5. CONCLUSIONES Y FUTUROS TRABAJOS

A tenor de estos resultados, la estimación de la banda IRoc-1 a partir de las bandas VIS-IRC en función del tipo de cubierta calculada con las imágenes y el mapa de cubiertas de una zona parecería extrapolable a otras zonas del mundo con otras imágenes y otros mapas de cubiertas. Si se confirmara, este sería un resultado extraordinariamente interesante, y hasta cierto punto sorprendente, con aplicaciones tanto para el mundo de los sensores en UAV y sus sinergias con imágenes de satélite, como para el diseño de nuevos

sensores de misiones espaciales.

En los próximos trabajos se efectuarán pruebas en más zonas del mundo y más fechas para corroborar de forma aún más robusta la aportación de los estudios que estamos realizando en este ámbito.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo cuenta con el soporte del Ministerio de Ciencia e Innovación y Universidades del Gobierno de España (MCIU) [número de ayuda PRE2019-088093] a Núria Cartes. También ha sido parcialmente financiado por el Gobierno Catalán mediante la ayuda (SGR2017-1690) y por el MCIU a través del proyecto de investigación DynaFun (PID2023-152719OB-C21 MCIU/AEI/ERDF, EU). Xavier Pons fue beneficiario del premio ICREA Academia. Algunos de nuestros colegas del Grupo de Investigación GRUMETS (UAB y CREAM) han realizado interesantes aportaciones a este trabajo.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Alemán-Montes, B., Zabala, A., Henríquez, C., Serra, P. (2023). Modelling Two Sugarcane Agro-Industrial Yields Using Sentinel/Landsat Time-Series Data and Their Spatial Validation at Different Scales in Costa Rica. *Remote Sensing*, 15(23). <https://doi.org/10.3390/rs15235476>
- Alvarez-Vanhard, E., Thomas, C., Houet, T., Emilien, A.-V., Thomas, H. (2021). UAV & satellite synergies for optical remote sensing applications: A literature review. <https://doi.org/10.1016/j.srs.2021.100019>
- Cartes, N., Pons, X. (2022). Correlación entre las regiones espectrales del IRoc y del VIS e IRC en imágenes Sentinel-2 en diferentes cubiertas mundiales: Retos y oportunidades. de la Riva J, Lamelas MT, Montorio R; Pérez F., Rodrigues M (Ed.), *Actas del XIX Congreso de Tecnologías de la Información Geográfica* (pp. 218–226). Universidad de Zaragoza. <https://zaguan.unizar.es/record/119771/files/BOOK-2022-039.pdf>
- Commission for Environmental Cooperation (CEC). (2023). *2020 Land Cover of North America at 30 Meters*. North American Land Change Monitoring System. Canada Centre for Remote Sensing (CCRS), U.S. Geological Survey (USGS), Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Ed. 1.0, Raster digital data [30-m]. Disponible en <http://www.cec.org/north-american-environmental-atlas/land-cover-30m-2020/> Último acceso: 8 de julio, 2024.
- Dainelli, R., Toscano, P., Di Gennaro, S. F., Matese, A. (2021). Recent advances in unmanned aerial vehicles forest remote sensing—a systematic review. Part ii: Research applications. *Forests*, 12(4). <https://doi.org/10.3390/f12040397>
- Gascon, F., Bouzinac, C., Thépaut, O., Jung, M., Francesconi, B., Louis, J., Lonjou, V., Lafrance, B., Massera, S., Gaudel-Vacaresse, A., Languille, F., Alhammoud, B., Viallefont, F., Pflug, B., Bieniarz, J., Clerc, S., Pessiot, L., Trémas, T., Cadau, E., Fernandez, V. (2017). Copernicus Sentinel-2A calibration and products validation status. *Remote Sensing*, 9(6). <https://doi.org/10.3390/rs9060584>
- González-Guerrero, O., Pons, X. (2020). The 2017 land use/land cover map of catalonia based on sentinel-2 images and auxiliary data. *Revista de Teledetección*, 2020(55), 81–92. <https://doi.org/10.4995/raet.2020.13112> Disponible en <https://agricultura.gencat.cat/ca/serveis/cartografia-sig/bases-cartografiques/usos-sol-subsol/usos-sol/> Último acceso: 8 de julio, 2024.
- Padró, J. C., Muñoz, F. J., Ávila, L. Á., Pesquer, L., Pons, X. (2018). Radiometric correction of Landsat-8 and Sentinel-2A scenes using drone imagery in synergy with field spectroradiometry. *Remote Sensing*, 10(11). <https://doi.org/10.3390/rs10111687>
- Phiri, D., Simwanda, M., Salekin, S., Nyirenda, V. R., Murayama, Y., Ranagalage, M. (2020). Sentinel-2 data for land cover/use mapping: A review. In *Remote Sensing* (Vol. 12, Issue 14). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/rs12142291>
- Pons, X. (2016). *MiraMon. Sistema d'Informació Geogràfica i software de Teledetecció*. (9.1f). Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestal; CREAM; Bellaterra 84-931323-4-9. Disponible en https://www.miramon.cat/Index_es.htm Último acceso 08 de julio, 2024.
- Zhao, Y., Feng, D., Yu, L., Wang, X., Chen, Y., Bai, Y., Hernández, H. J., Galleguillos, M., Estades, C., Biging, G. S., Radke, J. D., Gong, P. (2016). Detailed dynamic land cover mapping of Chile: Accuracy improvement by integrating multi-temporal data. *Remote Sensing of Environment*, 183, 170–185. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.05.016> Disponible en <https://data-starcloud.pcl.ac.cn/resource/18> Último acceso: 8 de julio, 2024.

Visor RiscBal: Monitorización y Modelización en Tiempo Real para la Gestión de Riesgos Naturales en Baleares

Joan Estrany^{1,2}, Josep Fortesa¹, Julián García-Comendador^{1,2}, Alexandre Moragues^{1,2}, Miquel Tomàs¹, Marta Rodríguez¹, Bartomeu Ramis¹, Jaume Ordinas¹, Jordi Cloquell¹, Miquel Llompart¹, Jaume Company^{1,2}, Francesc Cuello^{1,2}, Margalida Ribas^{1,2}, Maurici Ruiz-Pérez^{1,2,3}

¹ Observatorio de Riesgos Naturales y Emergencias de les Illes Balears -RiscBal. Centre Bit Raiguer, 07300, Inca (Illes Balears).

² Departamento de Geografía de la Universitat de les Illes Balears. 07122, Palma (Illes Balears).

³ Servicio de Sistemas de Información Geográfica y Teledetección -SSIGT. Universitat de les Illes Balears. 07122, Palma (Illes Balears).

joan.estrany@uib.cat, <https://orcid.org/0000-0003-3669-9936>

Josep Fortesa Bernat, <https://orcid.org/0000-0001-5764-303X>

Julián García Comendador, <https://orcid.org/0000-0001-9499-746X>

Alexandre Moragues, <https://orcid.org/0000-0002-2035-5509>

Miquel Tomàs Burguera, <https://orcid.org/0000-0002-3035-4171>

Jaume Company Ferrer, <https://orcid.org/0000-0003-3768-7507>

Miquel Llompart Cifre, <https://orcid.org/0009-0002-3943-6074>

Francesc Cuello-Llobell, <https://orcid.org/0009-0005-7021-4316>

Margarita Ribas Muntaner, <https://orcid.org/0000-0002-9857-6707>

Maurici Ruiz-Pérez, <https://orcid.org/0000-0002-5440-214X>

riscbal@uib.cat

RESUMEN: El visor Multiplataforma-RiscBal es una herramienta esencial para la gestión de riesgos en las Islas Baleares, una región vulnerable a peligros naturales debido a su alta exposición a fenómenos como inundaciones, incendios forestales, desertización, movimientos de tierra, y eventos meteorológicos extremos. El cambio climático y los procesos de cambio global han intensificado la frecuencia y gravedad de estos peligros en las últimas décadas, lo que ha aumentado el riesgo para la población y las infraestructuras, especialmente debido al creciente grado de artificialización del territorio. El visor Multiplataforma-RiscBal ofrece la posibilidad de monitorear en tiempo real más de 100 estaciones hidrometeorológicas repartidas por las islas, proporcionando datos cruciales para la toma de decisiones en situaciones de emergencia. Además, permite la visualización de modelos interactivos que evalúan el peligro de inundación a partir de la modelización de las cuencas hidrológicas. También incluye sistemas de alerta temprana integrados en cada cuenca, ofreciendo un apoyo fundamental para el área de Emergencias del Gobierno de las Islas Baleares.

Palabras-clave: Sistemas de alerta temprana, inundaciones, Islas Baleares, gestión de riesgos, riesgos naturales, monitorización hidrometeorológica.

1. INTRODUCCIÓN

El calentamiento global está provocando un cambio en las dinámicas climáticas y meteorológicas, estableciendo una tendencia en la que los fenómenos extremos reducen sus periodos de recurrencia, generándose así nuevos escenarios para la evaluación del riesgo de inundación (Alfieri et al., 2015). Estos nuevos escenarios tienden a aumentar el riesgo por inundaciones fluviales, exponiendo aún más a las sociedades, sobre todo en entornos climáticos altamente energéticos como el mediterráneo, donde la recurrencia de las

inundaciones repentinas o *flash-floods* puede verse incrementada notablemente. Además de las variables climáticas, los usos del suelo juegan un papel capital en el comportamiento de las riadas, pudiendo modificar los caminos preferentes del flujo, las velocidades y, en definitiva, el tiempo de concentración (Roger et al., 2017). En la actualidad, la dinámica de los usos del suelo en Europa muestra una evolución dicotómica. Por un lado, la expansión continua de las zonas urbanas y periurbanas, la mayoría ubicadas en zonas de baja altitud, planas y costeras, donde la población tiende a concentrarse. Por otro lado, el crecimiento de la cubierta forestal como consecuencia de procesos de forestación natural en antiguas zonas agrícolas y áreas de montaña (Gates y Ließ, 2001; García-Comendador et al., 2017). En consecuencia, el calentamiento global y los cambios en los usos del suelo hacen necesaria la evaluación y ajuste continuo del riesgo de inundación (Císcar Martínez et al., 2020) con una configuración de nuevos escenarios de vulnerabilidad frente a las inundaciones (Feyen et al., 2008).

Las inundaciones constituyen el desastre natural más común en Europa y España, suponiendo el 41% de estos desastres entre 2001 y 2020. En España, las inundaciones de los últimos 20 años causaron la muerte a 312 personas y pérdidas económicas de 800 millones de euros (MITECO, 2019). En este contexto, la región litoral mediterránea española es un paradigma de región climática de alta energía bajo una alta presión humana que ilustra ampliamente la transformación de la economía, la sociedad y el medio ambiente durante el siglo XX. Las cuencas de drenaje de esta región están dominadas por cursos fluviales relativamente cortos y de gradiente pronunciado, donde los episodios de lluvia intensa desarrollados por sistemas convectivos generan inundaciones espasmódicas extremas (Gaume et al., 2016; Estrany et al., 2020). Sin embargo, el papel de los episodios torrenciales extremos en estos sistemas fluviales no ha sido bien documentado en evaluaciones de riesgo anteriores, debido a que, por lo general, las cuencas tienen dimensiones pequeñas o medianas. A pesar de esto, concentran datos significativos en cuanto a víctimas y daños económicos, considerándose una de las amenazas más destructivas (Barredo, 2007). Debido al impacto social y económico de las inundaciones, se ha ido constituyendo un marco normativo europeo (Directiva 2007/60/EC) y español (Real Decreto 903/2010) para evaluar el riesgo de inundación y generar planes de gestión para reducir los efectos negativos de las inundaciones. No obstante, es necesario realizar un mayor esfuerzo para obtener una comprensión más profunda y una mayor consciencia sobre el riesgo, la exposición y la vulnerabilidad in situ, a fin de garantizar la efectividad de las políticas y una gestión integral, especialmente en cuencas pequeñas (menos de 500 km²) y a escalas locales (municipios).

Dicha comprensión y concienciación son esenciales para un ciclo eficaz de gestión del riesgo de inundaciones, que permita prevenir, mitigar, preparar, responder y recuperarse ante los desastres causados por inundaciones. Por este motivo, el grupo de investigación del Observatorio de Riesgos Naturales y Emergencias de las Islas Baleares y Medhycon ha desarrollado el Sistema de Alerta Temprana frente a Riesgos de Inundación de las Islas Baleares. Este sistema estará conformado por una densa red de estaciones hidrométricas que proporcionan datos de caudal en tiempo en cuencas con áreas con riesgo potencial significativo de inundación -ARPSI- y otras cuencas con antecedentes históricos de inundaciones. Además, se monitorizan la precipitación y la humedad del suelo mediante estaciones meteorológicas, complementadas con modelos hidrológicos. A partir de la observación en tiempo real y la modelización hidrológica, se está desarrollando un sistema de avisos basado en umbrales hidrométricos, que se comunica al Centro 112 de Emergencias de las Illes Balears para la gestión de alertas hidrológicas.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

Las Islas Baleares (4.985 km²) constituyen una región insular mediterránea donde los sistemas fluviales se caracterizan por unos regímenes hidrológicos intermitentes o efímeros, resultantes de la combinación de la geología, litología y el clima mediterráneo (Estrany et al., 2009; García-Comendador et al., 2017; Fortesa et al., 2020; Peña-Angulo et al., 2020; Estrany et al., 2020), presentando una variabilidad inter- e intra-anual significativa, así como una alta recurrencia de crecidas repentinas. Las cuencas de drenaje se estructuran a través de doce vertientes hidrológicas, siete de ellas en la isla de Mallorca (Ponent, Tramuntana, Badia de Pollença, Badia d'Alcúdia, Pla de Palma, Llevant y Migjorn). Menorca se divide en Tramuntana y Migjorn e Ibiza en Est y Oest. Formentera es considerada una única vertiente hidrográfica. La red hidrográfica balear está formada por cuencas pequeñas y medianas; únicamente siete superan los 100 km², y la mayor alcanza los 456 km².

Las Islas Baleares tienen una población de 1.209.906 (IBESTAT, 2022). Entre las islas mediterráneas, Mallorca ocupa el cuarto lugar en términos de población (914.564 habitantes), después de Sicilia, Cerdeña y

Chipre. Palma, con 415.940 habitantes (2022), es la segunda ciudad insular más poblada del Mediterráneo después de Palermo, habitando el 27% de la población de Palma dentro de la zona inundable ara un período de retorno de 500 años.

2.2. RiscBal-Control: red de estaciones hidrométricas de alerta temprana frente a riesgos de inundación de las Islas Baleares

La red hidrométrica de alerta temprana [RiscBal-Control](#) lleva en desarrollo desde el año 2004 (Figura 1). Está configurada por 55 estaciones hidrométricas que monitorizan en tiempo real el caudal (5 min), situándose en puntos estratégicos de cabecera ($26 < 10 \text{ km}^2$) y en tramos medios ($8 > 10 \text{ km}^2$) de cuencas que contienen áreas con riesgo potencial significativo de inundación -ARPSI- y otras cuencas pequeñas ($< 50 \text{ km}^2$) con antecedentes históricos de inundación. Estas 55 estaciones están equipadas con sondas digitales de presión del aire (OTT PLS) controladas por acumuladores de datos Campbell CR350. Además, se están realizando medidas de velocidad del agua para la obtención del caudal para garantizar la robustez y validez de los datos de caudal (Fortesa et al., 2019) para su uso en la modelización hidrológica. A su vez, se controla la precipitación y la humedad del suelo (intervalos cada 10 min.) en 29 estaciones meteorológicas (Figura 1).

Los datos hidrométricos son enviados en tiempo real mediante el sistema de telecomunicación de la Dirección General de Innovación e Investigación del Govern de les Illes Balears basado en tecnología Lora-WAN. Para una mayor recepción y duplicidad de datos en tiempo real se usa Narrow Band Internet of Things (NB-IoT) como segundo sistema de telecomunicación. Estas tecnologías permiten introducir la automatización en todas las estaciones hidrométricas de la red RiscBal-Control a un bajo coste de despliegue e implementación. Esta automatización permite la obtención y visualización de los datos en tiempo real, lo que permite monitorizar de manera continua el nivel del agua, precipitación y humedad del suelo, haciendo el sistema factible para la generación de alertas por riesgo de inundación. La respuesta hidrológica de los cursos fluviales mediterráneos se caracteriza por eventos de precipitación intensos y breves que se transforman en crecidas repentinas de pocas horas de duración e intensidad virulenta. Por este motivo, el envío de los datos se realiza cada 5 minutos (nivel de lámina de agua) y 10 minutos (precipitación y humedad del suelo).

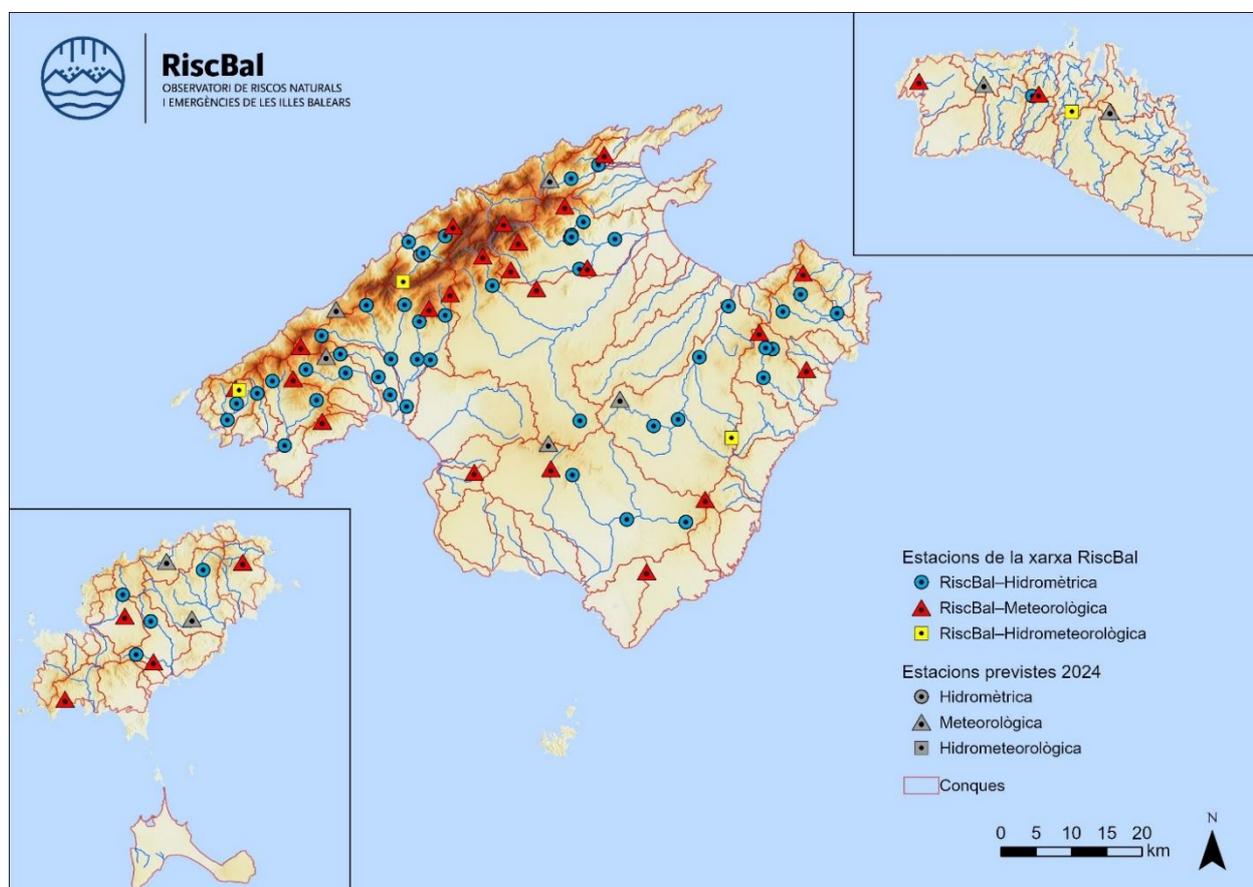


Figura 1. Mapa de la red de alerta temprana RiscBal-Control.

Los valores hidrométricos en tiempo real enviados mediante LoraWAN y NB-IoT se almacenan en los servidores de RiscBal. Aquí, en función de los valores alcanzados de precipitación, humedad del suelo y nivel de lámina de agua o caudal se generan avisos hidrológicos al Servicio Balear de Emergencia - 112 mediante un canal de comunicación de Telegram y la aplicación el visor Multiplataforma-RiscBal ([RiscBal-App](#)).

2.3. Modelización hidrológica e hidráulica

Las predicciones sobre la evolución del estado hidrológico de los torrentes de las Islas Baleares se realizan mediante modelización hidrológica, de la cual se obtiene una previsión de caudal ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) en distintos puntos de las cuencas modelizadas. Estas predicciones se ejecutan en tiempo real utilizando el software HEC-HMS, empleando como datos de entrada la estimación de lluvia obtenida del radar de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) y las condiciones iniciales de humedad del suelo obtenidas del European Flood Awareness System (EFAS). Estas simulaciones hidrológicas emplean como base de generación de escorrentía el método de número de curva, un método empírico de escorrentía superficial desarrollado por el Servicio de Conservación de Recursos Naturales (NRCS) del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA). Las simulaciones tienen en cuenta la propagación de la escorrentía generada a través de las subcuencas y por el curso fluvial, lo que permite la obtención del caudal simulado en distintos puntos de la red fluvial definida dentro del modelo hidrológico. Siguiendo el método del número de curva, las condiciones de humedad del suelo pueden ajustarse a tres categorías diferentes, dependiendo de si el suelo está: (i) seco, (ii) en condiciones normales o (iii) húmedo, derivadas del producto de humedad del suelo de EFAS.

Los modelos de simulación hidráulica se generan mediante el software HEC-RAS. Mediante trabajo de campo se recoge información topográfica con el uso de GPS y vuelos de dron con sensor LiDAR para generar modelos digitales del terreno de alta resolución (i.e., 25 cm px^{-1}). De la ortofoto generada con dron se realiza una cartografía de los usos para la obtención de coeficientes de rugosidad. El resultado de estas simulaciones permite obtener, para distintos caudales de referencia obtenidos para los periodos de retorno de 2,33 años (T 2,33), 5 años (T 5), 10 años (T 10), 25 años (T 25), 50 años (T 50), 100 años (T 100) y 500 años (T 500), la zona inundable, el calado y la velocidad del agua. La obtención de esta información permite realizar una vinculación entre los puntos donde se tienen datos de caudal (ya sea previsto u observado) con las zonas inundables y los equipamientos que puedan verse afectados, para generar avisos para diferentes periodos de retorno. La implementación de la funcionalidad en simulación hidrológica se ha realizado en 19 cuencas hidrográficas priorizando las cuencas en las que se ubican las ARPSI.

Para realizar una predicción que sea útil para las inundaciones por precipitaciones in situ, también consideradas dentro del Plan Especial de Protección Civil ante el Riesgo de Inundaciones de las Islas Baleares (INUNBAL), RiscBal ha desarrollado una herramienta que emplea como base la estimación espacial de la lluvia para identificar aquellos lugares donde: (i) se supera un determinado umbral de intensidad de precipitación sub-horaria, y (ii) se supera un determinado umbral de generación de escorrentía horaria, obtenido píxel a píxel aplicando el método del número de curva. A partir de este producto se determinarán diferentes umbrales para generar avisos para (1) subcuencas y (2) zonas urbanas que puedan tener un impacto sobre núcleos de población o infraestructuras críticas.

2.4. Elementos de riesgo

A partir de la monitorización en tiempo real y la modelización hidrológica se está confeccionando un sistema de avisos en función de umbrales hidrométricos que se transfieren al Centro 112 de Emergencias de las Islas Baleares con el objetivo de gestionar alertas hidrológicas. Los datos de caudal, tanto observados como predichos, se vinculan a los siguientes elementos con el fin de generar avisos específicos: (1) estaciones hidrométricas, (2) intersecciones de torrentes con la red viaria (i.e., puentes, badenes o pasos a nivel), (3) puntos negros de inundación determinados por las incidencias gestionadas por la Dirección General de Emergencias e Interior, (4) tramos de torrente, (5) zonas inundables y (6) equipamientos.

La vinculación entre un valor de caudal y los distintos elementos se realiza aplicando criterios hidrológicos a partir de la información generada con los proyectos de simulación hidrológica de HEC-HMS para cada cuenca. La división de una cuenca en subcuencas genera puntos de simulación (es decir, puntos de la cuenca donde se obtendrá un valor de caudal predicho) siguiendo un criterio hidrológico; es decir, las subcuencas y los puntos de simulación se generan en la confluencia de dos o más afluentes de la red de torrentes de la cuenca. Además, al ser las estaciones hidrométricas un punto donde es necesario obtener el caudal, la ubicación de estas también se ha considerado como un punto de simulación. A continuación, a cada punto de simulación se le asocia un valor de caudal para los diferentes periodos de retorno (T 2,33; T 5; T 10; T 25; T 50; T 100 y T 500). Posteriormente, se han vinculado los puntos de simulación con ubicaciones donde es

fundamental obtener el valor de caudal debido a los posibles impactos que pueda generar una inundación en estas. Es decir, se han vinculado los puntos de simulación con todos los elementos listados en el párrafo anterior (i.e. (1) estaciones, (2) intersecciones con la red viaria, (3) puntos negros, (4) tramos de torrente, (5) zonas inundables y (6) equipamientos). El hecho de que los puntos de simulación tengan asociados diferentes valores de caudal para cada periodo de retorno permite la generación de un aviso al superarse un umbral alcanzado por el caudal observado en una estación de la red RiscBal-Control o bien por la predicción de caudal mediante HEC-HMS.

3. SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA FRENTE A RIESGOS DE INUNDACIÓN DE LAS ISLAS BALEARES

El visor Multiplataforma-RiscBal ([RiscBal-App](#)), es una aplicación gratuita para la sociedad y cuerpos de emergencia, permite realizar un seguimiento en tiempo real durante episodios de inundación mediante datos hidrométricos de RiscBal-Control y la simulación hidrológica con los distintos umbrales de alerta a través de una navegación por jerarquía de escala (isla, vertiente hidrográfica, cuenca hidrográfica) junto a la geocalización del usuario.

Desde la puesta en funcionamiento del Sistema de Alerta Temprana en agosto de 2022, el sistema ha sido testado y validado por cuatro situaciones de emergencia, el 7 de octubre de 2022 afectando la vertiente hidrográfica de Llevant en la isla de Mallorca, el 27 de febrero de 2023 afectando las vertientes hidrográficas de Llevant, Pla de Palma y Badia d'Alcúdia en la isla de Mallorca, el 15 de agosto de 2024 afectando la vertiente hidrográfica de Tramuntana en la isla de Menorca y el 3 de setiembre de 2024 afectando la vertiente de Pollença en la isla de Mallorca. De este modo, durante estos episodios el Servicio Balear de Emergencias – 112 siguió en tiempo real el nivel de lámina de agua y recibió de manera automática los distintos niveles de aviso hidrológico (amarillo, naranja, rojo; Figura 2) según el caso, pudiendo activar las distintitas situaciones operativas estipuladas en Plan de Gestión del Riesgo de Inundación de las Islas Baleares (INUNBAL).



Figura 2. Detalle del nivel de agua (metros) de la estación hidrométrica de LLO01 – Es Mercadal de la aplicación RiscBal-App durante el episodio del 15 de agosto del 2024. Las líneas horizontales (amarilla, naranja, roja) corresponden a los distintos niveles de aviso hidrológico.

4. CONCLUSIONES

La red hidrométrica RiscBal-Control junto a la simulación hidrológica e hidráulica conforma el Sistema de Alerta Temprana de Inundaciones de las Islas Baleares, resultando de suma importancia frente a riesgos de inundaciones. Esta herramienta de transferencia de conocimiento implica una mejora en la gestión de la red fluvial de las Islas Baleares; con lo que la creación de un instrumento operativo de apoyo para la planificación y gestión de los recursos hídricos superficiales y el riesgo de inundación, da cumplimiento al Plan de Gestión del Riesgo de Inundación de las Islas Baleares (INUNBAL). De este modo, se alcanzará un elevado grado de capacidad predictiva frente situaciones de crecidas repentinas e inundaciones permitiendo anticipar el episodio de inundación y así realizar las acciones preventivas necesarias para disminuir los daños sociales y económicos que puedan generar las inundaciones.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado en el marco del encargo de gestión *Servicio de observación, análisis, modelización, sensorización y recogida de información científicotécnico de riesgos naturales y emergencias de las Islas Baleares* (MEPRO 2023 5340) y del convenio *Sistema de Alertas Tempranas frente a Riesgos de Inundación de las Illes Balears -INUNSA* financiados por la Dirección General de Emergencias e Interior de la Consejería de Presidencia, Función Pública e Igualdad del Govern de les Illes Balears. Además, el Ministerio de Ciencia e Innovación financia el proyecto de investigación *MEDhyCON-3 - Ecogeomorphic modelling in Mediterranean catchments: connectivity thresholds at multiple scales for land degradation assessment* PID2021-123707OB-I00 financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación; el proyecto de investigación *INFLOODMED - Integral flood risk management in small Mediterranean catchments: monitoring and protocols development for building resilient territories* TED2021-129834B-I00. El proyecto europeo C2IMPRESS - Co-Creative Improved Understanding and Awareness of Multi-Hazard Risks for Disaster Resilient Society financiado el programa europeo HORIZON y el proyecto de investigación *VULNER-ISLAND Evaluación de la vulnerabilidad a peligros naturales en la isla de Mallorca* PID2022-142704OB-I00 financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Alfieri, L., Burek, P., Feyen, L., & Forzieri, G. (2015). Global warming increases the frequency of river floods in Europe. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(5), 2247-2260.
- Barredo, J. I. (2007). Major flood disasters in Europe: 1950–2005. *Natural Hazards*, 42, 125-148. <https://doi.org/10.1007/s11069-006-9065-2>
- Císcar Martínez, J. C., Mentaschi, L., Vousdoukas, M. I., Gosling, S. N., Ward, P., Mongelli, I., ... y Hinkel, J. (2020). *Adapting to rising coastal flood risk in the EU under climate change*.
- Directive 2007/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2007 on the assessment and management of flood risks. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2007/60/oj>
- Estrany, J., Garcia, C. y Batalla, R. J. (2009). Groundwater control on the suspended sediment load in the Na Borges River, Mallorca, Spain. *Geomorphology*, 106(3-4), 292-303. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.11.008>
- Estrany, J., Ruiz-Pérez, M., Mutzner, R., Fortesa, J., Nàcher-Rodríguez, B., Tomàs-Burguera, M., García-Comendador, Peña, X., Calvo-Cases, A., Vallés-Morán, F. J. (2020). Hydrogeomorphological analysis and modelling for a comprehensive understanding of flash-flood damage processes: the 9 October 2018 event in northeastern Mallorca. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(8), 2195-2220. <https://doi.org/10.5194/nhess-20-2195-2020>
- European Commission, Directorate-General for European Civil Protection and Humanitarian Aid Operations (ECHO), Overview of natural and man-made disaster risks the European Union may face: 2020 edition, Publications Office, 2021, <https://data.europa.eu/doi/10.2795/1521>
- Feyen, L., Barredo, J. I., y Dankers, R. (2008). Implications of global warming and urban land use change on flooding in Europe. In: *Water and Urban Development Paradigms* (pp. 235-244). CRC Press.

- Fortesa, J., García-Comendador, J., Calsamiglia, A., López-Tarazón, J. A., Latron, J., Alorda, B. y Estrany, J. (2019). Comparison of stage/discharge rating curves derived from different recording systems: Consequences for streamflow data and water management in a Mediterranean island. *Science of The Total Environment*, 665, 968-981. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.158>
- Fortesa, J., Latron, J., García-Comendador, J., Tomàs-Burguera, M., Company, J., Calsamiglia, A. y Estrany, J. (2020). Multiple temporal scales assessment in the hydrological response of small mediterranean-climate catchments. *Water*, 12(1), 299. <https://doi.org/10.3390/w12010299>
- Fortesa, J., Ricci, G. F., García-Comendador, J., Gentile, F., Estrany, J., Sauquet, E., Datry, T. y De Girolamo, A. M. (2021). Analysing hydrological and sediment transport regime in two Mediterranean intermittent rivers. *Catena*, 196, 104865. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104865>
- Gates, L. D., & Liess, S. (2001). Impacts of deforestation and afforestation in the Mediterranean region as simulated by the MPI atmospheric GCM. *Global and Planetary Change*, 30(3-4), 309-328.
- García-Comendador, J., Fortesa, J., Calsamiglia, A., Calvo-Cases, A. y Estrany, J. (2017). Post-fire hydrological response and suspended sediment transport of a terraced Mediterranean catchment. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42(14), 2254-2265. <https://doi.org/10.1002/esp.4181>
- Ministerio para la Transición Ecológica – MITECO. 2019. Evaluación de la resiliencia de los núcleos urbanos frente al riesgo de inundación: redes, sistemas urbanos y otras infraestructuras. Gobierno de España. Octubre 2019.
- Pardo, I y Olsen, A.M. Tipologías A y B de los torrentes de las islas Baleares. Informe técnico. Direcció General de Recursos Hídrics. Conselleria de Medi Ambient. Directiva Marco del agua en las islas Baleares.
- Real Decreto 903/2010, de 9 de julio, de evaluación y gestión de riesgos de inundación. Publicado en: «BOE» núm. 171, de 15 de julio de 2010, páginas 61954 a 61967 (14 págs.). Sección: I. Disposiciones generales Departamento: Ministerio de la Presidencia. Referencia: BOE-A-2010-11184. Permalink ELI: <https://www.boe.es/eli/es/rd/2010/07/09/903>

3. PARTICIPACIÓN CIUDADANA Y COLABORACIÓN EN TIG

Dashboards geoespaciales y ciencia ciudadana. Fortalecimiento social para la transición hidrológica

J. Vargas Molina¹, P. Paneque Salgado²

¹ Departamento de Geografía. Universidad de Málaga

² Departamento de Geografía, Historia y Filosofía. Universidad Pablo de Olavide

jvarmol@uma.es, <https://orcid.org/0000-0001-5964-8192>

ppansal@upo.es, <https://orcid.org/0000-0003-0652-1520>

RESUMEN: Las TIG potencian la ciencia ciudadana al facilitar la recopilación y uso de datos geoespaciales por personas sin formación especializada. Las plataformas web de conocimiento geográfico mejoran la comunicación, el intercambio entre saber experto y no experto y promueven la democratización de la ciencia y la participación ciudadana en asuntos territoriales públicos. Precisamente, en España emerge con fuerza el debate sobre una de las políticas públicas más importantes del país: la transición hidrológica. Para fortalecer este debate resulta esencial desarrollar herramientas que faciliten el acceso a la información y faciliten la participación, el debate y la deliberación, no solo de los actores que han participado tradicionalmente sino también del conjunto de la ciudadanía. Con este objetivo se ha desarrollado un repositorio público de información geográfica sobre la situación del agua y de la sequía en España que recopila, homogeniza y comunica los datos ofrecidos por las distintas demarcaciones hidrográficas y otras administraciones públicas de forma accesible e interactiva para un público experto y no experto. El repositorio, basado en la herramienta *Dashboards* de *ArcGIS on line* permite la monitorización, el análisis y la personalización de los servicios y las métricas a visualizar aportando un gran valor para socializar y fortalecer el debate sobre la transición hidrológica. Además, es de gran utilidad también para fines educativos, académicos, técnicos y como soporte de procesos participativos y deliberativos.

Palabras-clave: ciencia ciudadana, Dashboards, recursos hídricos, transición hidrológica

1. INTRODUCCIÓN

La ciencia ciudadana es un nombre común para actividades y prácticas que implican la contribución de la ciudadanía en una o varias fases del proceso de investigación, entendiéndose por «ciudadano» a aquellos «ciudadanos, públicos, grupos sociales y comunidades», actores sociales que no son científicos profesionales (Kennedy, 2016). Aunque los modelos más representativos de ciencia ciudadana se vinculan con la coproducción de información mediante los denominados voluntarios ciudadanos, o personas que recopilan datos sobre el mundo que observan a su alrededor, es decir, datos que son principalmente observaciones (Purdam, 2014), en Ciencias Sociales y en aquellos problemas de investigación vinculados con temas de índole pública, es común un modelo de ciencia ciudadana en el que la contribución de los ciudadanos se centra en la interpretación de los datos o los resultados de investigación con el fin de concienciar e informar políticas públicas (Hacklay et al. 2020). Este desarrollo de proyectos de ciencia ciudadana supone un paso lógico hacia una ciencia más abierta y accesible, basada en métodos participativos, que democratizan la ciencia y aumentan el impacto social de la investigación (Albert et al., 2021).

Adicionalmente, en España ha cobrado una importancia significativa en los últimos años el debate sobre la transición hidrológica. Este debate surge como respuesta a las limitaciones del modelo actual de gestión del agua y a los desafíos añadidos que presentan las proyecciones de cambio climático regionalizadas para España en relación con la reducción de los recursos hídricos disponibles y el aumento en la frecuencia e intensidad de las sequías en el futuro (CEDEX, 2017).

La transición hidrológica aboga por una serie de transformaciones sociales, institucionales y políticas para asegurar una planificación y gestión del agua eficientes y sostenibles. El cambio hacia una transición

hídrica de estas características exige una reflexión y un debate profundo sobre el modelo de gestión del agua, que debe incluir a todos los agentes involucrados y al conjunto de la ciudadanía. Sin embargo, este debate se encuentra con importantes limitaciones de acceso a la información y participación para un público no experto. La información técnica sobre estado y usos del agua, de gran complejidad, se ha presentado siempre a modo de conocimiento experto, no asequible para públicos no especializados en esta materia. Esta información, además, presenta un importante grado de incertidumbre y dificultades en su trazabilidad temporal, incluso cuando se usa la misma fuente. Así, el debate ha estado capitalizado y monopolizado por los actores tradicionales, excluyéndose de la elaboración de diagnósticos y alternativas de gestión a la ciudadanía en toda su diversidad. A pesar de la obligación de apertura de procesos de información, consulta y participación pública por parte de la UE que establece la Directiva Marco del Agua del año 2000, estos se han reducido a procesos formales que poco o nada han modificado la política tradicional del agua.

Para avanzar hacia una participación y deliberación pública efectiva es fundamental realizar un esfuerzo mucho mayor de pedagogía por parte de las administraciones públicas responsables de la gestión del agua y de la comunidad científica que trabaja en estos temas, de forma que se eviten distorsiones o malas informaciones a la ciudadanía en general. Sin incorporar plenamente a la ciudadanía, la transición no resulta posible, ya que estamos hablando de cambios profundos que afectan, de manera central, a los agentes y a los discursos que articulan el debate. Para fortalecer este debate, es esencial desarrollar herramientas que faciliten el acceso a la información y promuevan la participación, el debate y la deliberación de todos los actores involucrados, incluyendo a la ciudadanía en general y que permitan generar opiniones informadas sobre el agua y la sequía, así como explicitar los valores e intereses en juego, lo que puede contribuir significativamente al avance del conocimiento científico y a una toma de decisiones informada.

Aquí, los avances de las Tecnologías de la Información Geográfica (TIG) pueden adquirir un valor diferencial. En concreto, las plataformas de conocimiento geográfico basadas en la web y accesibles desde cualquier navegador, contribuyen a mejorar la comunicación y transferencia de la investigación y el intercambio de conocimiento entre saber experto y no experto, fomentando el fortalecimiento social, la democratización de la ciencia y la implicación de la ciudadanía en cuestiones territoriales de índole pública. Con este objetivo, se ha creado un repositorio público de información geográfica sobre la situación del agua y la sequía en España. Este repositorio recopila, homogeneiza y comunica los datos proporcionados por diversas demarcaciones hidrográficas y otras administraciones públicas de manera accesible e interactiva para expertos y no expertos, utilizando la herramienta *Dashboards* de *ArcGIS Online*. Este recurso permite la monitorización, el análisis y el acceso a la información, además de la personalización de los servicios y métricas visualizadas. Además, el repositorio aporta un gran valor para socializar y fortalecer el debate sobre la transición hidrológica y resulta de utilidad para fines educativos, académicos, técnicos y como soporte en procesos participativos y deliberativos.

2. METODOLOGÍA

El objetivo del repositorio de información es generar una base de información geográfica, accesible desde cualquier navegador e interactiva, que incluya la información básica sobre la gestión del agua y de la sequía en el conjunto de España. Para ello se utiliza información oficial publicada por las administraciones con competencias en gestión del agua y la sequía. Las principales limitaciones de acceso a la información identificadas para subsanar con este repositorio de información son: 1) Existe una gran diversidad de administraciones con competencias en la gestión del agua y de la sequía que operan a diferentes escalas espaciales y temporales y que ofrecen información en diferentes formatos, unidades espaciales y plazos temporales. En concreto, 25 demarcaciones hidrográficas españolas y todos los municipios y empresas de abastecimiento urbano que gestionan de forma singular o mancomunada alguna parte del ciclo integral del agua urbana (CIAU) en España; 2) El lenguaje utilizado por estas administraciones es excesivamente técnico y, por tanto, de difícil acceso para un público no especializado; 3) Los formatos en los que se facilita la información no usan las ventajas de la digitalización y siguen predominando los documentos en PDF, con grandes volúmenes de información, entre los que resulta difícil navegar (algunos planes hidrológicos de demarcación alcanzan las 5.000 páginas). Si bien es cierto que en los últimos años ha habido un impulso importante por parte de algunas administraciones para digitalizar el acceso a la información mediante el desarrollo de Infraestructuras de Datos Espaciales o geovisores web, la información contenida en la mayoría de los casos sigue siendo demasiado especializada, estática y poco accesible a un público no experto. En definitiva, se constata un difícil acceso a la información para un público no especializado y por tanto la opinión pública sobre la gestión del agua y la sequía, fundamental en el debate sobre la transición hidrológica, queda fuera del debate político. A partir de aquí se ha seguido el siguiente proceso metodológico para la elaboración del repositorio de información y la elaboración de los Dashboards.

2.1. Recopilación de la información geográfica y temática para cada uno de los Dashboards generados

La información geográfica y temática utilizada para la elaboración de la base de datos geoespacial y el desarrollo de cada uno de los Dashboards se resume en la tabla 1.

Tabla 1. Dashboards incluidos en el repositorio, escala y fuentes de datos utilizadas para su elaboración

Dashboard	Escala	Fuente de datos geográfica	Fuente de datos temática
Masas de agua superficial	D. Hidrográfica	IDE MITERD	P.H. de Demarcación (2021-2027)
Masas de agua subterránea	D. Hidrográfica	IDE MITERD	P.H. de Demarcación (2021-2027)
Demandas de agua	D. Hidrográfica	IDE MITERD	P.H. de Demarcación (2021-2027)
Recursos disponibles	D. Hidrográfica	IDE MITERD	P.H. de Demarcación (2021-2027)
Recursos de reutilización	D. Hidrográfica	IDE MITERD	P.H. de Demarcación (2021-2027)
Capacidad de desalación	D. Hidrográfica	IDE MITERD	P.H. de Demarcación (2021-2027)
Estado de sequía prolongada	Unidades Territoriales de Sequía Prolongada (UTS)	IDE MITERD, Agencia Catalana del Agua e IDE Andalucía	Planes Especiales de Alerta y Eventual Sequía de las Demarcaciones Hidrográficas (2018)
Estado de escasez coyuntural	Unidades Territoriales de Escasez coyuntural (UTE)	IDE MITERD, Agencia Catalana del Agua e IDE Andalucía	Planes Especiales de Alerta y Eventual Sequía de las Demarcaciones Hidrográficas (2018) e Informes mensuales de seguimiento de sequía prolongada y escasez coyuntural del MITERD, S.I.H.A. Hidrosur

2.2. Homogeneización de la información y generación de base de datos

La base de datos geoespacial se ha elaborado con el software *ArcGIS Pro* que incluye toda la información que se utiliza posteriormente para el desarrollo de las herramientas de *Dashboards* con *ArcGIS Online*, con el que además se puede conectar facilitando la interoperabilidad del tratamiento de los datos entre ambas plataformas. Puesto que la información temática se ofrece a menudo en diferentes formatos y con diferentes datos, se ha tenido que hacer una homogeneización de la información obtenida de las diversas fuentes de datos temáticas para poder representar de forma uniforme dicha información en las herramientas de *Dashboards*.

2.3. Generación de herramientas de *Dashboards* de *ESRI on line*

Una vez organizada la base de datos en *ArcGIS Pro*, se conectó con *ArcGIS on line*, que genera una serie de capas con diferentes utilidades. Se genera un *shapefile* para cada una de las capas de información que se quieren representar y un *Feature Layer* de cada una de ellas. Dentro del interfaz de *ArcGIS on line*, los *shapefiles* son la base que contienen la información geográfica y temática y los *Feature layer* actúan como capas editables que pueden convertirse en *web maps* que serán finalmente incluidos en las herramientas de *Dashboards*. Cabe mencionar aquí, que una vez elaborados los *web maps* en el interfaz *ArcGIS on line*, estos se pueden utilizar en otras aplicaciones y servicios webs, además de en la aplicación de *Dashboards*, como por ejemplo en la aplicación de *Story maps*.

2.4. Integración y difusión de los Dashboards

Una vez elaborados todos los *Dashboards* se han puesto a disposición del público integrándolos en la página web del Observatorio Ciudadano de la Sequía, junto con herramientas que permiten el diálogo con los usuarios y la corrección o incorporación de datos, previa revisión del equipo técnico que ha elaborado la herramienta. Además, se han incluido herramientas de diálogo entre los usuarios y los desarrolladores, con el doble objetivo de recibir posibles correcciones o sugerencias de mejora y, por otro lado, recibir demandas de información identificadas por usuarios para la generación de nuevos *Dashboards*.

3. RESULTADOS

Los *Dashboards* se han diseñado con la misma estructura y las mismas posibilidades de interacción para facilitar su uso por parte de la ciudadanía en general. Todos se componen de tres elementos fundamentales: 1) Como elemento central de los *Dashboards* está el marco de mapa o mapas donde se presenta la información geográfica, el acceso a la leyenda del mapa o mapas, así como otros elementos con los que el usuario puede interactuar (icono para el cambio de capas base de referencia, herramienta de zoom, escala y desplegable con la posibilidad de activar o desactivar capas temáticas en aquellos *Dashboards* en los que puede resultar necesario). En el marco de mapa también se habilita la opción de *pop-ups* al hacer “click” en cualquiera de los elementos que muestra cada uno de los mapas; 2) el segundo elemento es el cuadro de indicadores, que incluye indicadores cuantitativos a modo de resumen sobre uno o más atributos asociados a las diferentes capas de información que se muestran en el mapa; 3) por último, el cuadro de selectores permite hacer una selección en base a alguno de los atributos de la capa de información geográfica que se visualiza. En este caso, se han utilizado selectores administrativos, es decir, muestran la información solo en función de la selección de uno o varios atributos administrativos (por ejemplo, demarcación hidrográfica, provincia...) o en función de algún atributo temático, como, por ejemplo, tipología de masas de agua, estado químico, etc. Estos indicadores que se pueden activar y desactivar, están conectados tanto al marco del mapa, de manera que al aplicar un selector se hace zoom sobre el atributo seleccionado y en el mapa solo muestran la información sobre ese atributo, así como con el cuadro de indicadores, de manera que, al seleccionar un atributo en el cuadro de selectores, los indicadores mostrados se recalculan de manera instantánea en función del atributo seleccionado. A continuación, se presentan los principales *Dashboards* generados, así como las herramientas de interacción y visualización incluidos en cada uno de ellos.

En la Figura 1 se presentan los Dashboards sobre el estado de masas de agua superficial y subterránea para todas las Demarcaciones Hidrográficas españolas.

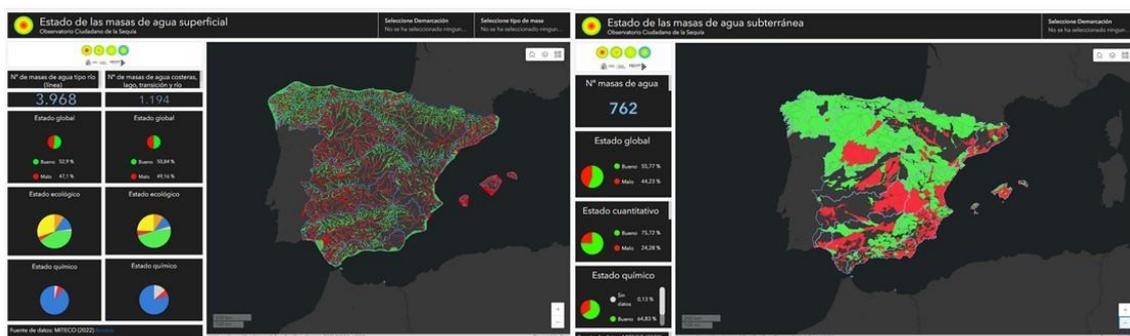


Figura 1. Dashboards sobre estado de masas de agua superficial (izda.) y estado de masas de agua subterránea (dcha.)

En el marco de indicadores se pueden consultar los datos sobre el estado global, el estado químico y el estado ecológico de las masas de agua superficial y el estado global, el estado cuantitativo y químico de las masas de agua subterránea. El selector permite seleccionar una o varias demarcaciones además de seleccionar las masas de agua en función de su tipología. En los *pop-ups* se incluye información sobre el código y el nombre de la masa de agua, la valoración del estado global, químico, ecológico o cuantitativo, los objetivos ambientales propuestos y la demarcación hidrográfica a la que pertenece.

La Figura 2 muestra las demandas de agua en función del tipo de uso (agraria, industrial y urbana) para todas las demarcaciones hidrográficas españolas. En la imagen se representa el % de demanda de agua agraria, pero en el selector de capas se puede seleccionar y visualizar también el % de demanda industrial o urbana.

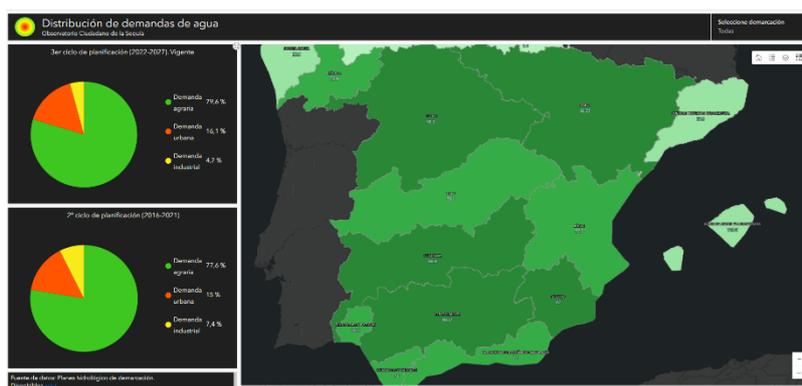


Figura 2. Dashboards sobre demandas de agua

En el marco de indicadores se pueden consultar los datos sobre la distribución de las demandas de cada demarcación hidrográfica, tanto en el segundo ciclo de planificación (2016-2021) como en el actual y vigente (2022-2027). En el marco de selectores se puede seleccionar una o varias demarcaciones hidrográficas. En los *pop-ups* de cada demarcación se puede consultar el nombre de la demarcación y el volumen de cada tipo de demanda, tanto en hm³/año como en % respecto al total.

La Figura 3 muestra el índice de estado mensual de cada una de las Unidades Territoriales de Sequía (UTS) y de escasez coyuntural (UTE) de acuerdo a los Planes Especiales de Alerta y Eventual Sequía (PES) de cada una de las demarcaciones hidrográficas españolas.

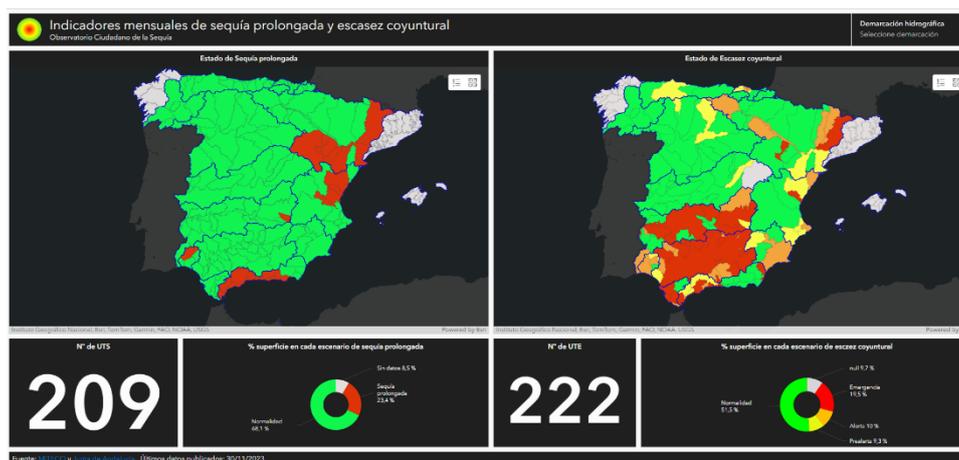


Figura 3. Dashboards sobre estado de sequía prolongada (izda.) y escasez coyuntural (dcha.)

En el marco de indicadores se señala el número de UTE y UTS, así como la distribución % del índice de los escenarios en los que se encuentran (sequía prolongada o normalidad, para las UTS y normalidad, prealerta, alerta o emergencia para las UTE). En los selectores se puede seleccionar una o varias demarcaciones hidrográficas para obtener la información en base a dicha selección. En los *pop-ups* se incluye el nombre y código de cada UTE y UTS, la demarcación a la que pertenece y el valor del índice de estado mensual. Este *Dashboard* se actualiza mensualmente.

Por último, la Figura 4 muestra el *Dashboard* sobre capacidad de desalación y volumen de aguas regeneradas de cada demarcación hidrográfica.

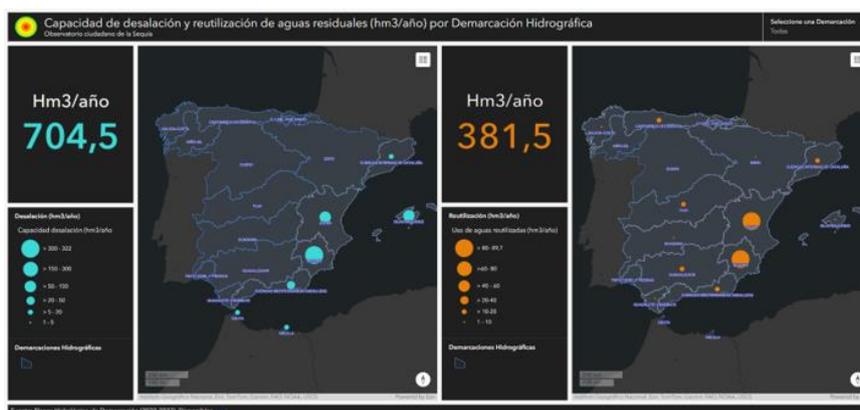


Figura 4. Dashboards sobre capacidad de desalación (izda.) y volumen de aguas regeneradas (dcha.)

La información de los indicadores engloba los resultados totales o en función de demarcación hidrográfica seleccionada. Los *pop-ups* muestran información tanto del volumen de agua regenerada como de la capacidad de desalación de cada demarcación hidrográfica, además del nombre de la demarcación.

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Entre las diversas aplicaciones de las TIG en este sentido, especialmente relevante y novedoso resulta el desarrollo de estas herramientas para alimentar procesos de ciencia ciudadana y facilitar la participación, deliberación y en definitiva el debate sobre políticas públicas. En este sentido, las dificultades de acceso a información sobre el agua y la sequía y la trascendencia del debate sobre la transición hidrológica exigen desarrollar herramientas TIG capaces de comunicar información geográfica y alfanumérica compleja de forma sencilla, interactiva y accesible para cualquier usuario y contribuyen significativamente al intercambio de conocimiento entre un público experto y no experto, fomenta el fortalecimiento social, la democratización de la ciencia y la implicación de una ciudadanía más formada e informada en el debate público. La generación de este repositorio de información geográfica a través de la herramienta *Dashboard* de ESRI *on line*, ha permitido avanzar en esta línea, gracias a la capacidad de sintetizar información en indicadores sencillos y a la posibilidad de personalizar los servicios ofrecidos (información geográfica e indicadores) en función de los intereses de cada usuario mediante la herramienta de selectores. Así el repositorio se ha utilizado con fines educativos, de investigación, en procesos de participación y deliberación pública y ha tenido una importante presencia en medios de comunicación. Como limitaciones de la herramienta se identifica la dificultad para incorporar series temporales o integrar en un solo selector acciones sobre capas de diferente geometría. Las limitaciones de acceso a la información geográfica y alfanumérica generada por algunas administraciones han impedido el desarrollo de algunos de los *Dashboards* diseñados en un principio, como, por ejemplo, el de recursos disponibles de cada demarcación hidrográfica, o trabajar a otras escalas propias de la planificación, como por ejemplo los sistemas de explotación. En la actualidad se sigue trabajando en la elaboración de nuevos *Dashboards* en base a las demandas de información de organizaciones, usuarios y ciudadanía en general mediante los canales de diálogo facilitados en el repositorio. El acceso a la información contenida en el repositorio es accesible a través de www.observasequia.com.

AGRADECIMIENTOS

La publicación es parte del proyecto PID2022-139046OA-I00, financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033/FEDER, UE una manera de hacer Europa.

5. BIBLIOGRAFÍA

Albert, A., Balázs, B., Butkevičienė, E., Mayer, K., Perelló, J. (2021). "Citizen Social Science: New and Established Approaches to Participation in Social Research". En K. Vohland *et al.* The Science of Citizen Science. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-58278-4_7

CEDEX (Centro de estudios hidrográficos y experimentación de obras públicas) (2017). *Evaluación del cambio climático en los recursos hídricos y las sequías en España*. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Madrid, España. https://ceh.cedex.es/web_ceh_2018/documentos/CAMREC/2017_07_424150001_Evaluaci%C3%B3n_cambio_clim%C3%A1tico_recu.pdf

Haklay, M., Motion, A., Balázs, B., Kieslinger, B., Greshake Tzovaras, B., Nold, C., Dörler, D., Fraisl, D., Riemenschneider, D., Heigl, F., Brounéus, F., Hager, G., Heuer, K., Wagenknecht, K., Vohland, K., Shanley, L., Deveaux, L., Ceccaroni, L., Weißpflug, M., Wehn, U. (2020). *ECSA's Characteristics of Citizen Science*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3758668>

Kennedy, H. (2016). *Post, mine, repeat: Social media data mining becomes ordinary*. London, Palgrave Macmillan. ISBN: 978-1137353979

Purdam, K. (2014). Citizen social science and citizen data? Methodological and ethical challenges for social research. *Current Sociology*, 62(3), 374–392. <https://doi.org/10.1177/0011392114527997>

Expansión urbana y procesos de turistificación en “Son Sunyer”, Palma de Mallorca

R. Pizà Roca¹

¹ Facultad de Geografía e Historia, Universidad Complutense de Madrid. Edif. B, Calle del Prof. Aranguren, s/n, 28040 Madrid (Madrid).

rosapizaroca@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0004-9350-0772>

RESUMEN: En los últimos 75 años el turismo se ha convertido en la principal actividad económica en las Islas Baleares, transformando profundamente su realidad territorial, social, política y comercial. Este estudio analiza la transformación en una zona de la Playa de Palma, específicamente en los barrios de Sometimes, Las Maravillas, Ses Cadenes y S’Arenal de Palma, que formaban parte del Pinar de Son Sunyer, a través de un enfoque cuantitativo y cualitativo. Utilizando sistemas de información geográfica y fotointerpretación, se analiza el impacto urbanístico desde 1957 hasta 2024, mostrando un crecimiento ininterrumpido de la infraestructura hotelera, especialmente entre 1957 y 1984, cuando se construyeron 91 hoteles. Entre 1984 y 1998 se redujo el crecimiento, pero aumentó la calidad de las infraestructuras, y entre 1998 y 2008 la construcción se centró en construcciones extrahoteleras, vinculadas a la burbuja inmobiliaria. Desde 2008, ha habido un resurgimiento en la construcción hotelera. Este modelo de crecimiento sostenido ha generado problemas de convivencia con los residentes, como ruido, suciedad y privatización de espacios públicos, derivados de la masificación turística. La falta de planificación ha exacerbado estos problemas, sugiriendo la necesidad de una mayor regulación.

Palabras-clave: Playa de Palma, turismo, turismofobia, Sistemas de Información Geográfica.

1. INTRODUCCIÓN

Han pasado 73 años desde que se celebró la Primera Asamblea Turística de Mallorca. Desde entonces, las Islas Baleares se han convertido en el territorio con más presión turística del país (García, 08/05/2024).

De acuerdo con la literatura científica, en estos 73 años se describen tradicionalmente tres olas de turistificación, o booms turísticos, en las Islas Baleares (Blázquez y Murray, 2010). La primera ola desde finales de la década de los ‘50 hasta 1973, con un declive debido a la crisis del petróleo, se basó en un crecimiento intensivo urbanístico de hoteles y grandes bloques. Esta primera etapa es la que caracteriza el área de estudio del presente trabajo y está también muy relacionada con el turismo de las 4 S (Sun, Sand, Sea and Sex). Existe una segunda etapa expansionista en los ‘80, y finalmente, después de un segundo momento de recesión turística en 1988, llega el tercer boom turístico a finales de los ‘90 (Rullan, 1998). Desde los ‘90 hasta la actualidad se ha mantenido el crecimiento, sólo interrumpido por la crisis financiera del año 2007 y la pandemia COVID-19. Superándose en 2015 los 14 millones de turistas y casi 18 millones de turistas en 2023 (Agencia de Turismo de las Islas Baleares, 2024). Se trata, en definitiva, de un modelo de crecimiento sostenido. Sin embargo, la conocida como “industria sin humos” (Murray, 2012) ha ido mostrando que sí cuenta con una serie de impactos en el territorio en el que se desarrolla, si bien no son humos. En los últimos años la palabra turismofobia ha aparecido, casi de la noche al día, en el vocabulario de millones de españoles (Sanmartín Sáez, 2019). Este fenómeno, producto de los efectos de la masificación y la presión turística (o turistificación (Sanmartín Sáez, 2019), se manifiesta en un malestar social que ha eclosionado en eventos, manifestaciones y acciones contestatarias en ciudades como Palma de Mallorca, San Sebastián, Barcelona, Lisboa, Ámsterdam, Florencia o Venecia, entre otras. (Milano, 2017; Huete y Mantecón 2018). La acción desreguladora/reguladora de los poderes públicos ya ha demostrado su importancia en el sector turístico (Artigues y Blázquez, 2012), así como el valor de los procesos participativos como método de comprensión y de articulación de esta posible regulación (Artigues y Blázquez, 2012; Ortiz et al., 2014). En el caso de la ciudad de Palma, la participación ciudadana en el conocimiento y la participación activa del proceso de toma de decisiones relacionado con la implementación de actividades turísticas en una determinada área, ha sido

limitada o nula (Melo et al., 2021).

En el presente trabajo se va a analizar la transformación turística en los barrios de Sometimes, Las Maravillas y S'Arenal de Palma, que formaban parte del pinar de Son Sunyer, un paisaje natural virgen a principios del siglo pasado, ubicado en la Playa de Palma. Para ello se realiza un análisis temporal de la urbanización en el área con técnicas de teledetección para cuantificar y demostrar la transformación turística. Se trata de un reconocimiento del proceso de construcción del área, considerado clave para comprender la situación actual y los orígenes de los conflictos actuales. A su vez, y en el marco de la actual idea de gestión inteligente de los territorios, se realiza un análisis cualitativo de la transformación mediante una recogida de testimonios con los residentes en el área. Se explora su vivencia durante la transformación y su discurso sobre ella, así como su relación con la situación actual, recogiendo sus necesidades para el futuro de convivencia residencial y turística.

2. METODOLOGÍA

2.1. Delimitación del área de estudio

La Playa de Palma no tiene límites administrativos definidos. Es un área bautizada para reunir, bajo una sola marca turística, las playas desde el centro de Palma hasta S'Arenal. El estudio se centra en el área que formaba parte, históricamente, del pinar de Son Sunyer (la que fue la "possessió" más extensa de Palma) y que más tarde se transformó en el punto neurálgico de grandes complejos hoteleros. El área de estudio se amplió a las cinco secciones censales que hoy contendrían el pinar: 0704005009, (...)011, (...)012, (...)014 y (...)020 (Figura 1).

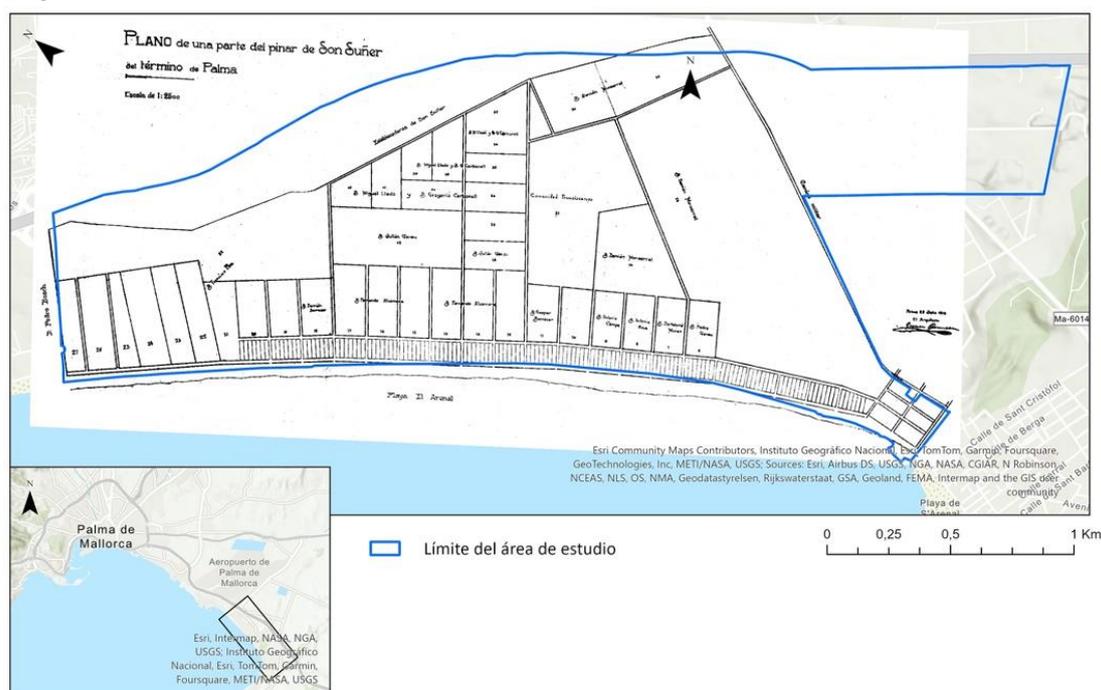


Figura 1: Superposición del plano de parcelación del pinar de Son Sunyer (Gaspar Bennàssar, 1913) con el área de estudio de este trabajo, compuesta por las secciones 009, 011, 012, 014 y 020. Fuente: Elaboración propia.

2.2. Metodología del análisis cuantitativo

El presente estudio utiliza sistemas de información geográfica y técnicas de fotointerpretación para cuantificar y demostrar la rápida transformación del área. Las huellas de los edificios se obtuvieron del catastro (campo CONSTRU), y representaban la situación actual. A través de técnicas de fotointerpretación, con imágenes aéreas disponibles en el IGN de los años 2008 (PNOA), 1998 (OLISTAT), 1984 (Vuelo Nacional) y 1957 (Vuelo Americano), se ha retrocedido en el tiempo de forma consecutiva con dichos años, notando el año de aparición para cada edificio. También se cartografiaron edificios ya no existentes, para los que se señaló el año de aparición y desaparición.

Los edificios se clasificaron según sus usos actuales mediante herramientas digitales y trabajo de campo. Inicialmente, se utilizó Google Maps, incluyendo la función de Street View, para obtener información

sobre el uso de los edificios. Esta información se verificó utilizando el motor de búsqueda de Google. Finalmente, las dudas restantes se aclararon a través de las salidas de campo. Las tipologías establecidas fueron:

- Edificios residenciales y mixtos. Construcciones que, si bien pueden albergar casas o apartamentos de alquiler vacacional, no tienen un uso específico para ello. Son mixtos puesto que muchos cuentan en la planta baja con tiendas y comercios orientados a turistas.
- Hoteles y bloques de apartamentos vacacionales.
- Comercios y servicios redireccionables. Edificaciones que contienen supermercados, negocios o restaurantes, y que tienen la capacidad de orientarse hacia el turista.
- Servicios públicos y privados no redireccionables. Servicios como colegios o comisarías de policía que no pueden orientarse hacia el turista.

2.3. Metodología del análisis cualitativo

La metodología del análisis cualitativo ha consistido en salidas de campo en calidad de observador participante. Se han realizado 19 entrevistas a residentes del área de estudio, en diferentes puntos de la misma: cuatro en la sección 020, seis en la sección 009, tres en la sección 011, tres en la sección 014 y dos en la sección 012.

3. RESULTADOS

3.1. Transformación

En el año 1957 nos encontramos la situación previa a la turistificación del área. De acuerdo con los entrevistados, consistía en un número reducido de chalets residenciales en las zonas de Las Maravillas y Sometimes, con una urbanización más desarrollada en S'Arenal, un antiguo núcleo de pescadores. Esto cuadra con los datos obtenidos sobre superficie media y el total de hoteles en ese momento (Tabla 1).

Tabla 1. Estadística de la urbanización por tramos. Unidades de superficie en metros cuadrados.

AÑO	Edificaciones nuevas	Superficie media / mediana	Superficie total construida	Superficie construida por año	Actualmente hoteles	Superficie media / mediana	Superficie total hoteles
1957	488	156 / 128	75.921	-	5	404 / 384	2.022
1984	806	414 / 203	333.369	12.347	91	1.370 / 1.025	124.635
1998	186	407 / 193	75.795	5.414	8	1.695 / 844	13.563
2008	193	420 / 176	80.972	8.097	2	2.815	5.630
2024	78	660 / 174	51.523	3.963	15	2.713 / 521	40.699

En el año 1984 se puede observar el mayor cambio registrado (Tabla 1, Figura 2). Se construyeron 333.369 m², lo que equivale a 12.347 m²/año. Esto es un incremento del 339% sobre 1957. De los 806 edificios que se construyeron, 91 son actualmente hoteles. Si bien sólo son un 11,3 % de las edificaciones, representan un 37,4% de la superficie construida. Se observa un incremento del 239,1 % en el tamaño de las nuevas infraestructuras hoteleras respecto al año 1957, que cuentan con una media de 1.370 m² de planta (Tabla 1). Los entrevistados corroboran que, si bien desde mediados de los '50 había empezado la presencia de algún hotel, fue a mediados de los '70 cuando se produjo el mayor cambio paisajístico.

En el año 1998 podemos apreciar un retroceso constructivo (Tabla 1), con descenso desde 12.347 m²/año a 5.414 m²/año. De hecho, de los 8 hoteles construidos sólo 3 son nuevos. Los otros 5 se tratan de ampliaciones o reconstrucciones, ampliando los hoteles y aumentando su calidad.

En el año 2008 se puede apreciar un repunte en la construcción, construyéndose 8.097 m²/año (Tabla 1). Cabe destacar que esta construcción no está centrada en plazas hoteleras, puesto que, de los 193 edificios nuevos, sólo 2 son hoteles. Sin embargo, estos tienen un gran tamaño, como el Grupotel Playa de Palma, con una huella de 5.390 m², que representa el 6,65% del total de superficie construida.

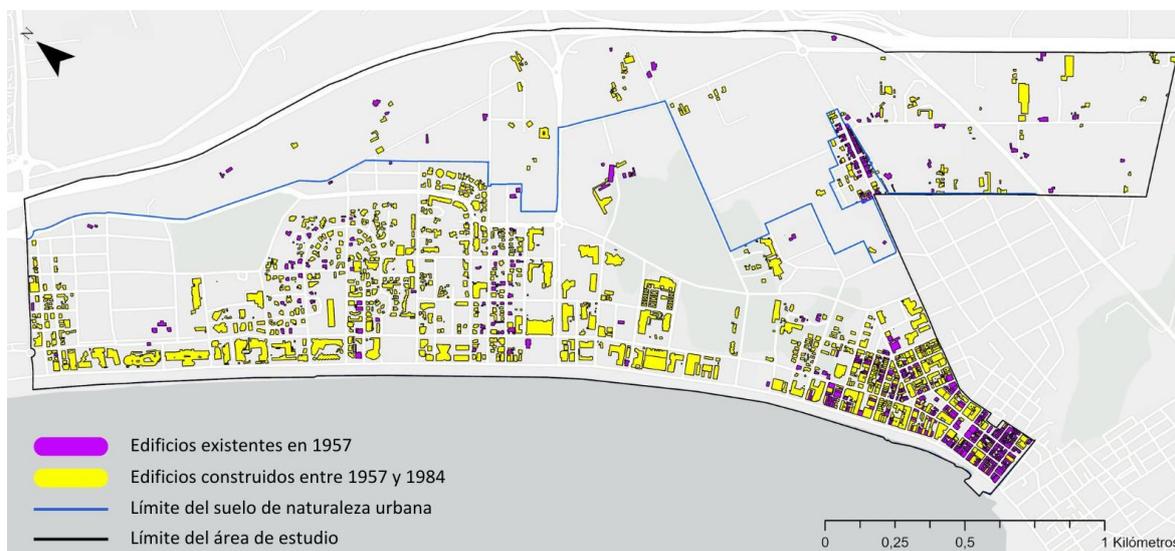


Figura 2: Mapa del área de estudio con los edificios existentes en 1957 y 1984. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del catastro.

Finalmente, en el año 2024 se observa la descongelación de nuevas plazas hoteleras (Tabla 1). Es el período de menor construcción general, con 3.963 m²/año y sólo 78 edificaciones. Sin embargo, la construcción hotelera vuelve a aumentar construyéndose 15 hoteles nuevos. De esta manera, mientras éstos representan un 20,5% del total de edificaciones construidas, consumen un 78,9% del total de superficie construida.

3.2. Situación actual

En la actualidad, nos encontramos con 598.574 m² construidos. Un 31,2 % son hoteles y bloques de apartamentos vacacionales, mientras los edificios residenciales y mixtos ocupan un 52,2% (Tabla 2, Figura 3). Si contabilizamos los hoteles con los comercios y servicios privados redireccionables suman entre ambos un 44,7 % del espacio, dejando el otro 55,3% para los residentes y servicios no redireccionables. Además, en este análisis no se han tenido en cuenta los alquileres vacacionales en chalets y adosados o en edificios residenciales, que podrían incrementar considerablemente la porción del área construida dedicada al turismo. De esta manera, se podría afirmar que la industria turística ocupa prácticamente la mitad del espacio construido en el área de estudio.

Las entrevistas con los residentes llevaron a destacar tres problemas principales: suciedad, ruido y un exceso de plazas turísticas que provocan una privatización del espacio. Algunos entrevistados denunciaron el modelo turístico del “turismo de borrachera”, culpando a los macro bares de la zona (que un entrevistado señaló que era necesario cerrar) y a touroperadores y hoteleros, por el formato del todo incluido, con bajas tarifas que atraen a ese tipo de turista. Asimismo, cuando se preguntaba a los entrevistados por las maneras en las que, desde el servicio público, se podían atajar los problemas de suciedad y ruido, se respondía que ellos “hacen su trabajo, lo que pasa es que no dan abasto”. Respecto al exceso de plazas turísticas (el problema más señalado), se pedía regulación. Se denunciaba que el número no deja de crecer año tras año, y que tal vez no basta con poner el límite en el presente, sino que se debe retroceder. Cabe destacar que no se encontró ningún discurso completamente contrario a la industria turística, reconociendo al turismo como una de las principales fuentes de ingresos de la isla.

Tabla 2. Estadística de la tipología de uso de las edificaciones.

	<i>Edificaciones</i>	<i>Superficie media / mediana</i>	<i>Superficie total construida</i>
<i>Edificios residenciales y mixtos</i>	1.442	217 / 157	312.499

Hoteles y bloques de apartamentos vacacionales	121	1.542 / 914	186.549
Comercios y servicios privados redireccionables	111	731 / 303	81.168
Servicios públicos y servicios no redireccionables	14	1.311 / 1.195	18.357
TOTAL	1.688	355 / 170	598.574

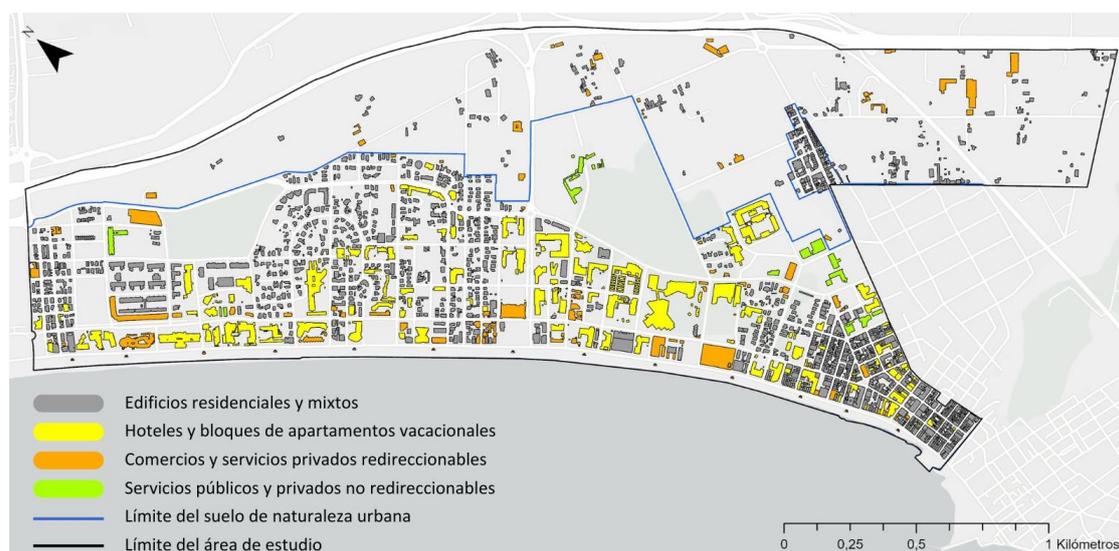


Figura 3: Mapa de los diferentes usos de las edificaciones en 2024. Fuente: Elaboración propia.

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En los últimos 75 años, el desarrollo turístico del área de estudio no ha parado de crecer. Del 1957 al 1984, se produce una urbanización masiva, con la construcción de 91 hoteles en esta área, inicialmente caracterizada por una densidad urbanística mínima en un entorno muy natural. Los datos sobre estos se ajustan al modelo diseñado en la Primera y Segunda Asamblea Turística de Mallorca: La creación del turismo de grandes resorts y el todo incluido (Vives, 2005). En el segundo período, de 1984 a 1998, vemos un descenso del número de hoteles nuevos, pero un aumento en su tamaño y calidad. Este periodo contiene la bajada turística de finales de los '80, donde se comenzó a hablar de saturación de plazas turísticas y se empezó a reinvertir en la infraestructura existente (Murray, 2012). Entre el año 1998 y 2008, se puede apreciar un impulso a la construcción extrahotelera, coincidiendo con la burbuja inmobiliaria. Este cambio parece responder al tercer boom, descrito por Rullan (1998). Finalmente, se detecta del 2008 a 2024, una nueva oleada de crecimiento hotelero, tanto en el número de edificaciones como en su tamaño medio.

En definitiva, la zona de estudio ha padecido en los últimos 75 años una transformación radical que, de acuerdo con los resultados de este análisis, se trata de una transformación eminentemente turística. La urbanización masiva de la zona no responde al desarrollo natural de la ciudad de Palma, sino a fines de explotación turística. En este trabajo se ha calculado que casi la mitad de las edificaciones están dedicadas a la explotación turística, creando un gueto turístico. Esta cifra es, seguramente, mucho menor que la real, debido a la dificultad de demostrar que muchas edificaciones clasificadas como residenciales se destinan al uso turístico (alquiler vacacional). Esta cifra se eleva a casi el 100% en el caso de la primera línea de playa. Esto se traduce en una privatización del espacio público, que queda como espacio de uso turístico. A su vez, provoca una sensación de alienación con el espacio por parte de los residentes, que no lo sienten como propio, característica clave de los procesos de turistificación (Calle-Vaquero, 2019).

La presente área de estudio presenta una transformación marcada por la desregulación y la falta de planificación, provocando una concentración que provoca conflictos con los residentes permanentes en el área. Destacan la suciedad, el ruido y un exceso de plazas turísticas que provoca una privatización de los espacios públicos. Se trata, en definitiva, de externalidades negativas de la industria turística. En este punto, y en el debate regulador, se puede plantear si deberían ser las propias empresas explotadoras las encargadas de paliar los efectos negativos que provocan en el entorno. Especialmente, cuando el residente señala que

los servicios públicos llevan a cabo sus tareas de limpieza de forma diaria, y el problema es que “no dan abasto”. La limitación que presenta la industria turística frente a esta solución está en sus líneas difusas de responsabilidad. Es decir, no presenta un único propietario, sino un entramado de hoteles, comercios y servicios propiedad de una gran diversidad de empresas. Además de la convivencia espacial del uso turístico con el residencial, siendo este último responsabilidad de los servicios públicos.

El rápido desarrollo turístico, descrito en la literatura científica y observable en el presente trabajo, podría presentar paralelismos con la revolución industrial de principios del siglo pasado. Se trata de una actividad económica que revoluciona las morfologías sociales, urbanas y económicas, transformando la vida que en el lugar se desarrolla (Hiernaux, 2008; Urry, 1990). Sin embargo, la industria del humo terminó por ser deslocalizada de los centros urbanos 75 años después, debido a sus impactos negativos sobre el entorno, creando los polígonos industriales. En el caso del sector turístico, que si bien no está compuesto por fábricas que emiten contaminación atmosférica sí produce una serie de impactos que contaminan el entorno (suciedad, ruido, masificación...), la reubicación no es posible por la relación directa entre el fenómeno y el territorio en el que se desarrolla. Sin embargo, los sistemas de información geográfica han resultado tremendamente útiles para el análisis del fenómeno, dadas las cualidades espaciales que presenta. Siendo la mayoría de los malestares fruto de la masificación y la concentración, parece que un camino interesante es la cuantificación espacial del fenómeno y de los umbrales de tolerancia del residente.

Los resultados de este trabajo, en lo que respecta al observable crecimiento sostenido de la industria turística en los últimos 75 años y al interés por el bienestar del residente en el área estudiada, apuntan directamente a la discusión regulacionista. A tratar de comprender el turismo como una única industria, si bien cuenta con numerosos propietarios, para poder cuantificar correctamente su tamaño e impactos en el entorno, permitiendo la convivencia residencial con el fenómeno.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Agencia de Turismo de las Islas Baleares. (s.f.). *Anuarios de turismo: datos informativos*. Consejería de Modelo Económico, Turismo y Trabajo. https://www.caib.es/sites/estadistiquesdelturisme/es/anuarios_de_turismo-22816.
- Artigues, A. A., Blázquez, M. (2012). ¿Reconversión o desregulación? Análisis de planes de reconversión turística-inmobiliaria de la Playa de Palma (Mallorca). *Cuadernos de turismo*, 29, 11-34.
- Blázquez, M. B., Murray, I. (2010). Una geohistoria de la turistización de las islas Baleares. *El periplo sostenible*, 18, 69-118.
- Calle-Vaquero, M. de la (2019). Turistificación de centros urbanos: clarificando el debate. *Boletín De La Asociación De Geógrafos Españoles*, 83, 1-40.
- García, X. (08/05/2024). “Les Illes Balears són el territori amb major pressió turística de tot Espanya”. *IB3 N*. <https://ib3.org/illes-balears-territori-major-pressio-turistica-tota-espanya> (6 de septiembre de 2024).
- Hiernaux, D. (2008). Una década de cambios: la Geografía Humana y el estudio del turismo. *Diez años de cambios en el Mundo, en la Geografía y en las Ciencias Sociales, 1999-2008*, Actas del X Coloquio Internacional de Geocrítica. Barcelona, Universidad de Barcelona.
- Huete, R., Mantecón, A. (2018). El auge de la turismofobia ¿hipótesis de investigación o ruido ideológico? *PASOS Revista de Turismo y Patrimonio Cultural*, 16 (1), 9-19.
- Melo, L., Barrera, M., Franconetti, J. (2021). La presión turística y el proceso de gentrificación: un análisis de Palma de Mallorca-España. *Contribuciones a las Ciencias Sociales*, 1 (1), 6-22.
- Milano, C. (2017). Turismofobia: cuando el turismo entra en la agenda de los movimientos sociales. *Marea urbana*, 1(1), 5-8.
- Murray Mas, I. (2012). *Geografies del capitalisme balear: poder, metabolisme socioeconòmic i petjada ecològica d'una superpotència turística*. [Tesis doctoral, Universitat de les Illes Balears]. Cora, Tesis doctorals en Xarxa.
- Ortiz, G., Aledo, A., García-Andreu, H. (2014). La participación ciudadana como instrumento para la planificación e investigación social en turismo. *Revista Iberoamericana de Turismo*, 4(2), 13-39.
- Rullan, O. (1998). “De la Cova de Canet al Tercer Boom turístic. Una primera aproximació a la geografia històrica de Mallorca”. En B. Tomàs (Coord), *El medi ambient a les Illes balears. Quí és quí?* (pp. 171-213). Palma de Mallorca, Ed. Sa Nostra.

Sanmartín Sáez, J. S. (2019): Análisis del discurso, ideología y neologismos: turismofobia, turistización y turistificación en el punto de mira. *Círculo de lingüística aplicada a la comunicación*, 78, 63-90.

Urry, J. (1990). *The tourist gaze*. Londres, Sage.

Vives, A. (2005). *Història del Foment del Turisme de Mallorca (1905-2005)*. Palma, Foment del Turisme de Mallorca.

Los mapas web como soporte a procesos de participación y ciencia ciudadana

R. Olivella González¹, G. Boix Xamaní¹, J. Sitjar Suñer¹

¹Servicio de Sistemas de Información Geográfica y Teledetección (SIGTE) de la Universidad de Girona. Plaça Ferrater Mora, 1, 17004 Girona.

rosa.olivella@udg.edu, gemma.boix@udg.edu, josep.sitjar@udg.edu

RESUMEN: En esta comunicación exponemos cuatro casos de aplicación en los que el Servicio de Sistemas de Información Geográfica y Teledetección (SIGTE) de la Universidad de Girona ha desarrollado soluciones *web mapping* (o mapas web) en un contexto tanto de ciencia ciudadana como de participación ciudadana. Se trata de proyectos reales que hacen referencia a diferentes contextos de aplicación:

- Estudio del mosquito tigre a partir de ciencia ciudadana. A partir de la información recabada por la ciudadanía se llevan a cabo estudios de gestión en torno al seguimiento de la presencia de esta especie.
- Rehabilitación de un espacio fluvial urbano a través de un proceso participativo.
- Gobernanza colaborativa del paisaje cultural y natural, un proyecto de formación aplicada a varios casos de estudio en varios países europeos.
- Renaturalización urbana a partir de la biodiversidad y la infraestructura ecológica como ejes vertebradores de una ciudad

Cada proyecto ha requerido una aplicación del *web mapping* diferente y muy adaptada a las necesidades, por lo que la suma de los cuatro casos nos permite ver un amplio abanico de posibilidades de esta tecnología en el contexto de la ciencia o participación ciudadana.

Palabras clave: *web mapping*, *storymap*, participación ciudadana, ciencia ciudadana

1. INTRODUCCIÓN

Pensar en el territorio, reportar sobre él y compartir son aspectos clave en procesos tanto de ciencia ciudadana como de participación ciudadana; en definitiva, en procesos en los que se requiere a la ciudadanía que mire con detalle hacia el territorio. En este contexto, el mapa es crucial, es la herramienta de ubicación, de abstracción de la realidad, y el mapa web lo es si además queremos interactuar con este mapa o queremos expandir nuestra interacción con la ciudadanía.

En sus orígenes, la primera función que se podía esperar de una solución de *web mapping* era tan solo de visualización, pero con la evolución informática y de internet las funcionalidades cada vez son más sofisticadas y con tendencia a asimilarse a las que integran un SIG de escritorio. Contrariamente al SIG de escritorio, sin embargo, el *web mapping* (a nivel de usuario) se ha diseñado como una herramienta para un público no tan especializado, a fin de potenciar el funcionamiento colaborativo, y también como una solución para el trabajo en tiempo real. La principal función que se atribuyó al *web mapping* fue la de mostrar datos sobre un mapa para difundirlos por la red. Esta misión ha ido evolucionando y ya no solo se orienta a mostrar sino también permite filtrar datos, realizar consultas, editar nuestra propia información e incluso llevar a cabo alguna operación de análisis (como el cálculo de distancias o de rutas).

En el mercado existen componentes esenciales (librerías) de *web mapping* que combinados entre sí permiten publicar mapas en la web. Pero también es posible encontrar soluciones que ya integran dichos componentes y que ofrecen como resultado final un producto a punto para la publicación y el mantenimiento de mapas web tal como ofrece la suite de soluciones ArcGIS Online (<https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-online/overview>). En el caso que nos ocupa, nos referiremos a aplicaciones *web mapping* desarrolladas con componentes/librerías *opensource* y que se han adaptado a cada uno de los cuatro proyectos a partir de los cuales se basa esta comunicación.

2. METODOLOGÍA

Para desarrollar estas aplicaciones, se utilizaron diferentes herramientas y estrategias, condicionadas a las particularidades y requisitos de cada una.

El backend de ViuLaRiera, por ejemplo, fue desarrollado con CodeIgniter, un framework de PHP, debido a que el hosting en el que debía alojarse la aplicación y en el que ya había otras páginas del proyecto creadas con WordPress no admitía otros lenguajes. En cuanto a la base de datos se utilizó MySQL que, a pesar de no disponer de funcionalidades específicas para el almacenaje y consulta de datos geoespaciales, permitió guardar sin problemas en campos de tipo double los pares de coordenadas correspondientes a las localizaciones introducidas por los usuarios.

El backend de las demás aplicaciones, en cambio, se desarrolló con Django, un framework de Python. Y en cuanto a las bases de datos, se utilizó en estos casos PostgreSQL/PostGIS, debido a la necesidad de guardar geometrías más complejas (líneas, polígonos) y realizar operaciones de análisis espacial. En el caso de Gironat, además, se utilizó Django Rest Framework para la construcción de la API Rest.

En el frontend de estas aplicaciones se han utilizado librerías opensource para la creación de mapas web interactivos, tales como OpenLayers o Leaflet. Se han utilizado, además, frameworks de desarrollo web para lograr un diseño responsive: Bootstrap en ViuLaRiera, Materialize en SavingScapes y Vue.js junto con Quasar en las aplicaciones Mosquito Alert y Gironat.

3. CUATRO PROYECTOS, CUATRO CONTEXTOS DE PARTICIPACIÓN CIUDADANA Y CIENCIA CIUDADANA

3.1. Estudio del mosquito tigre

A partir de una aplicación móvil, la iniciativa “[Mosquito Alert](#)” recoge las aportaciones de la ciudadanía con respecto a la presencia del mosquito tigre en el territorio (mundial). Basándose en estas aportaciones, básicamente fotografías e identificación del lugar, los expertos entomólogos que están detrás de la iniciativa pueden determinar de qué especie se trata (mosquito común, mosquito tigre, mosquito de la fiebre amarilla, mosquito del Japón o mosquito de Corea). Las aportaciones validadas permiten alimentar una base de datos con componente temporal y territorial que facilita a científicos y gestores la toma de decisiones.



Figura 22. Vista global de los reportes de mosquitos por la ciudadanía del proyecto Mosquito Alert.

Si bien la aplicación móvil es la fuente de entrada de los datos, el mapa web se ha utilizado como reporte de los resultados obtenidos, con una doble finalidad:

- Devolver a la ciudadanía su aportación, a partir de mostrar las contribuciones de toda la comunidad y la valoración de los expertos y así retroalimentar la importancia de la participación.

- Como herramienta de gestión epidemiológica y de análisis territorial de las distintas especies de mosquitos, a partir de las diferentes representaciones de los datos, la descarga de los datos visualizados o la generación de informes a partir de los datos mostrados en la vista del mapa.

3.2. Rehabilitación de un espacio fluvial urbano

En el marco del proyecto “[Viu la Riera](#)”, el SIGTE llevó a cabo un SIG basado en plataformas de *web mapping* para facilitar la participación del público en la rehabilitación de paisajes fluviales urbanos. El objetivo del proyecto era fomentar la implicación de la ciudadanía en un proceso de decisión sobre la planificación y gestión del entorno de la Riera de Caldes (Barcelona), que afecta a diversos municipios. La herramienta desarrollada permitiría llegar a más implicados y serviría también de apoyo a procesos colaborativos (talleres).

Para ello se diseñó una solución *web mapping* que respondiera a las tres fases del proceso participativo, que se describen a continuación.

- Fase “Opina”. Se trata de la primera fase de recogida de datos. A partir de la identificación de un punto en el territorio de estudio permitía opinar, especificar los parámetros positivos y negativos que suscitaba el lugar y proponer mejoras a partir de formularios asociados al punto identificado.
- Fase “Decidimos”. En esta fase la solución desarrollada permitía:
 1. Visualizar y consultar los resultados obtenidos en la fase anterior, la fase “Opina”, y por lo tanto poder ver las aportaciones de todos los participantes y caracterizar así el espacio de la Riera según la opinión de los participantes.
 2. Analizar las propuestas aportadas en la fase “Opina” y comentarlas y debatirlas con el fin de ayudar al proceso de decisión de las posibles actuaciones en el espacio de la Riera.



Figura 2. Web mapping de la fase “Decidimos” del proyecto Viu la Riera.

- Fase “Mójate”. Finalmente, en la última etapa del proceso participativo se desarrolló un mapa web para seguir fomentando la participación ciudadana, en este caso para crear comunidad. Se trata de una solución que permitía reportar de forma autónoma aquellas acciones (ambientales, educativas, socio-culturales, deportivas o lúdicas) que los agentes del territorio llevaban a cabo.

3.3. Gobernanza colaborativa del paisaje cultural y natural

El tercer ejemplo se enmarca en el proyecto “[Saving Scapes](#)”, un proyecto europeo que tiene como objetivo mejorar la conciencia del paisaje y la gobernanza colaborativa del paisaje cultural y natural a partir de herramientas de aprendizaje innovadoras. Se trata del desarrollo de un constructor de cuestionarios (Ci-

tizen Science Application, como se ha denominado en el marco del proyecto; en adelante, CSA) con componente espacial y de acuerdo con la metodología y enfoque diseñados a partir del proyecto "Saving Scapes". En términos generales, la CSA debía permitir:

- Responder a cualquier proceso participativo con características comunes/similares a las establecidas por el proyecto.
- Generar cuestionarios con una estructura y un patrón común, pero que al mismo tiempo permita una cierta adaptación al caso específico.

Para ello, la solución de CSA se desarrolla teniendo en cuenta tres componentes:

1. Un generador de cuestionarios con componente espacial
2. El cuestionario propiamente dicho
3. Un mapa web de resultados conectado a cada cuestionario y que al mismo tiempo que los participantes del caso de estudio van respondiendo al cuestionario, es posible visualizar las respuestas en él

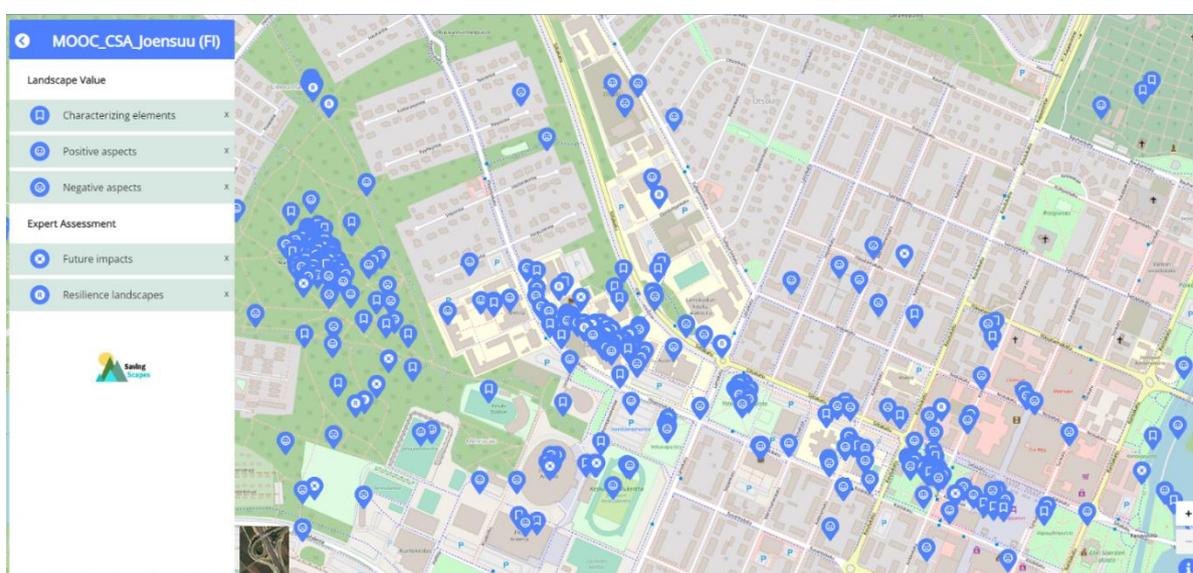


Figura 3. Mapa web de los resultados del cuestionario del proyecto Saving Scapes.

3.4. Renaturalización urbana

El proyecto "[Gironat: giro hacia la renaturalización para una Girona más resiliente y saludable](#)" propone una transformación urbana impulsando la biodiversidad y la infraestructura ecológica como ejes vertebradores, transformando Girona en una ciudad más verde, resiliente y saludable.

Para valorar dicha transformación que se ha diseñado una encuesta sobre la percepción, el uso y conocimiento de las infraestructuras verdes y azules de la ciudad. La encuesta se realiza en inicio del proyecto y se pretende comparar con resultados obtenidos al final de este, una vez llevadas a cabo algunas de las acciones de renaturalización.

El mapa web en este caso permite:

- Acompañar la encuesta en aquellas cuestiones más directamente relacionadas con el territorio, permitiendo a la ciudadanía encuestada interactuar y seleccionar espacios, opinar sobre ellos

- Reportar los resultados de la encuesta. En este caso el mapa web se viste de *storymap*.

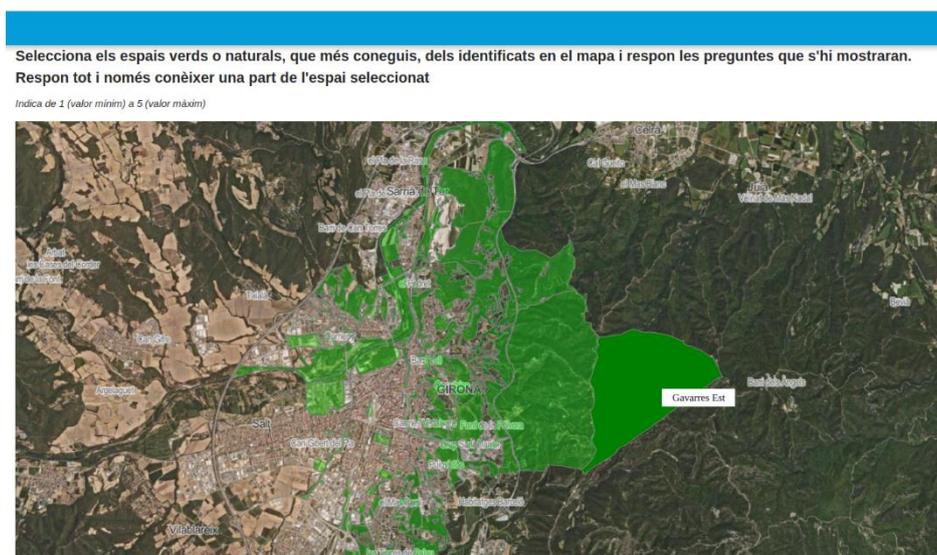


Figura 4. Pregunta con formato mapa web de la encuesta de percepción del proyecto Gironat.

En este proyecto el *storymap* toma protagonismo y encuentra su razón de ser al acompañar el proceso de comunicación. Ya que un proyecto que requiere de una transformación urbana ambiciosa, como es el caso, requiere de mecanismos de comunicación eficaces. Para ello se ha utilizado el *storymap* tanto para reportar los resultados de la encuesta (<https://mapscloud.udg.edu/gironatenquesta>), como para comunicar las acciones que se han llevado o llevarán a cabo en el marco del proyecto (<https://arcg.is/OfGniH>).

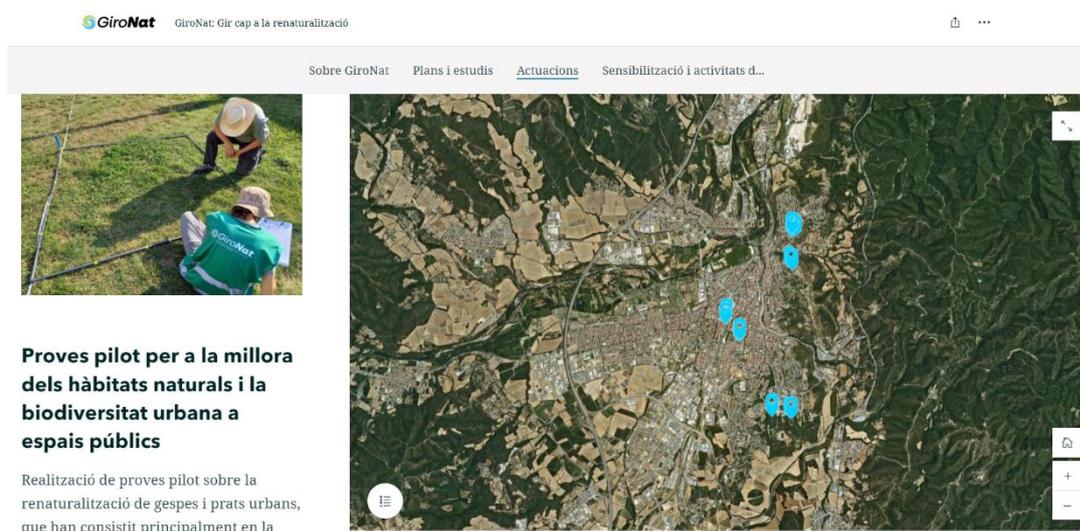


Figura 5. Imagen del *storymap* de difusión de actuaciones del proyecto Gironat.

4. CONCLUSIONES

El *web mapping* es una herramienta que permite llevar a cabo procesos de participación o ciencia ciudadana a distancia y de forma asíncrona, o bien como apoyo a talleres o actos presenciales de debate y recogida de datos. Se trata de una herramienta muy versátil ya que, si bien existen soluciones y productos ya preestablecidos, tal como trabajamos en el SIGTE, su aplicación es adaptable a cada caso.

A partir de los proyectos presentados hemos podido ver soluciones de mapa web que dan respuesta a:

- La configuración/generación de aplicaciones para la recogida de información.
- El tratamiento de datos a nivel de análisis.

- La visualización de resultados de forma pública y en tiempo real.
- La exploración de los datos a partir de los diferentes atributos recogidos o del análisis llevado a cabo.
- La explotación de resultados para su uso científico o de gestión, a partir de la generación de indicadores e informes o de la descarga de datos.
- La comunicación

En los cuatro casos de aplicación se ha podido llegar a una gran cantidad de la comunidad objetivo. En el caso de “Mosquito Alert”, el proyecto es de alcance mundial y ha permitido involucrar a muchos agentes diferentes: ciudadanía que reporta o ciudadanía que se informa, docentes que utilizan el recurso para hacer difusión, entomólogos que obtienen datos primarios o gestores que lo utilizan como herramienta para la toma de decisiones.

En otros casos la comunidad objetivo es más limitada pero la solución *web mapping* adoptada ha permitido una recogida de datos más eficiente para su posterior análisis, ya que va directamente a la base de datos sobre la que aplicar los análisis pertinentes, como en el caso de “Viu la Riera”. O ha permitido la autonomía de generar y ajustar la solución *web mapping* al proceso concreto, como ha sido el caso del constructor de cuestionarios del proyecto “Saving Scapes”.

Gironat tiene un importante componente territorial y comunicativo al mismo tiempo, el *storymap* permite contar una historia que pasa en un lugar determinado, un espacio cotidiano para la ciudadanía, pero con una lectura (la de la biodiversidad urbana) poco conocida.

AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer a los promotores de los cuatro proyectos que se describen en esta comunicación (“Mosquito Alert” –CEAB-CSIC–, “Viu la Riera” y “Saving Scapes” –ambos de la UdG–, “Gironat” –Ajuntament de Girona-) la oportunidad de haber participado en su desarrollo.

4. SECTORES DE APLICACIÓN Y USO DE LAS TIG

Análisis de patrones de movilidad turística en Madrid mediante datos de telefonía móvil

R. Talavera-García¹, B. Moya-Gómez¹, J. Gutiérrez-Puebla¹

¹ Departamento de Geografía, Universidad Complutense de Madrid. C. Profesor Aranguren s/n, 28040 Madrid.

rtalaveragarcia@ucm.es, <https://orcid.org/0000-0003-4749-3546>

bmoyagomez@ucm.es, <https://orcid.org/0000-0002-0520-039X>

javiergutierrez@ghis.ucm.es, <https://orcid.org/0000-0003-2611-8587>

RESUMEN: El turismo es sin duda uno de los principales motores económicos de multitud de ciudades. Sin embargo, los turistas que visitan las ciudades no se distribuyen homogéneamente en la ciudad, si no que acuden a determinados lugares de interés histórico-artístico influenciados por publicidad o redes sociales. Comprender los patrones espacio-temporales que tienen los turistas en las ciudades es fundamental para poder gestionar los recursos de manera adecuada. En este contexto, los datos de telefonía móvil son una fuente de información útil para evaluar los patrones de movilidad y entender mejor las dinámicas urbanas. Este trabajo analiza los patrones de movilidad de los turistas en la ciudad de Madrid a partir de los datos de telefonía móvil. Los resultados muestran patrones esperados de presencia y movilidad de turistas a zonas centrales de la ciudad y lugares con fuerte atractivo turístico como parques históricos. En definitiva, la aplicación de tecnologías de información geográfica, junto con el análisis de datos de telefonía móvil mediante Python, se presenta como una herramienta efectiva para comprender y caracterizar la presencia y la movilidad turística en Madrid. Además, permite, dado el uso tan extendido de los teléfonos móviles, tener una muestra amplia y significativa de la presencia y desplazamientos de los turistas, lo que le confiere un gran potencial como herramienta para la toma de decisiones y la gestión en las ciudades que tiene un marcado carácter turístico como es el caso de Madrid.

Palabras-clave: turismo, movilidad, telefonía móvil, COVID-19.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la generación de grandes volúmenes de datos (Big Data) en las llamadas Smart Cities es una realidad cada vez más presente, tanto en el ámbito público vinculado al transporte público o los sensores, como en el ámbito privado donde vehículos compartidos o dispositivos móviles generan multitud de información útil para los objetivos de las empresas vinculadas a estos sectores. Esta generación masiva de información está propiciando también una comprensión más profunda y precisa de las ciudades, convirtiéndose en una fuente esencial para la toma de decisiones en la planificación de las ciudades (Batty, 2013).

En este contexto, los datos masivos ofrecen una valiosa oportunidad para diferentes sectores, incluido el turismo. Las fuentes oficiales de datos turísticos carecen habitualmente de la precisión espacial y temporal necesaria para la comprensión del comportamiento de los turistas. Sin embargo, los turistas generan una huella digital que aporta una gran cantidad de información y que puede complementar otras fuentes de datos, permitiendo tener una visión bastante amplia y a la vez detallada del comportamiento de los turistas (Girardin et al., 2008). Entre las fuentes más destacadas están las aplicaciones GPS, registros de tarjetas bancarias, plataformas de alojamientos (Gutiérrez et al., 2017), fotografías en redes sociales (Salas-Olmedo et al., 2018) y datos de telefonía móvil (Talavera-García et al., 2023), entre otros.

En este estudio, utilizamos datos de telefonía móvil para analizar los patrones de movilidad y presencia turística en la ciudad de Madrid. En las secciones siguientes, presentamos una visión general del área de estudio, una descripción de los datos y metodología seguida, para posteriormente analizar los patrones de presencia de turistas y sus flujos de desplazamiento. Finalmente, discutimos las principales conclusiones del estudio y exploramos las oportunidades y limitaciones que presentan los datos de telefonía para el análisis de la movilidad turística.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

Para analizar el potencial de los datos de telefonía en el análisis de la movilidad turística se ha seleccionado el municipio de Madrid (Figura 1). Madrid es un destino turístico muy solicitado, que atrae a millones de personas cada año, y cuya riqueza cultural, sus destacados monumentos, estadios deportivos y fiestas atraen a turistas de todo el mundo (García-Palomares et al., 2015). Esta variedad de elementos atractores da lugar a que se generen una diversidad de tipos de turismo (cultural, deportivo, de negocios, de compras, etc.) lo que permite una desestacionalización de la demanda turística.

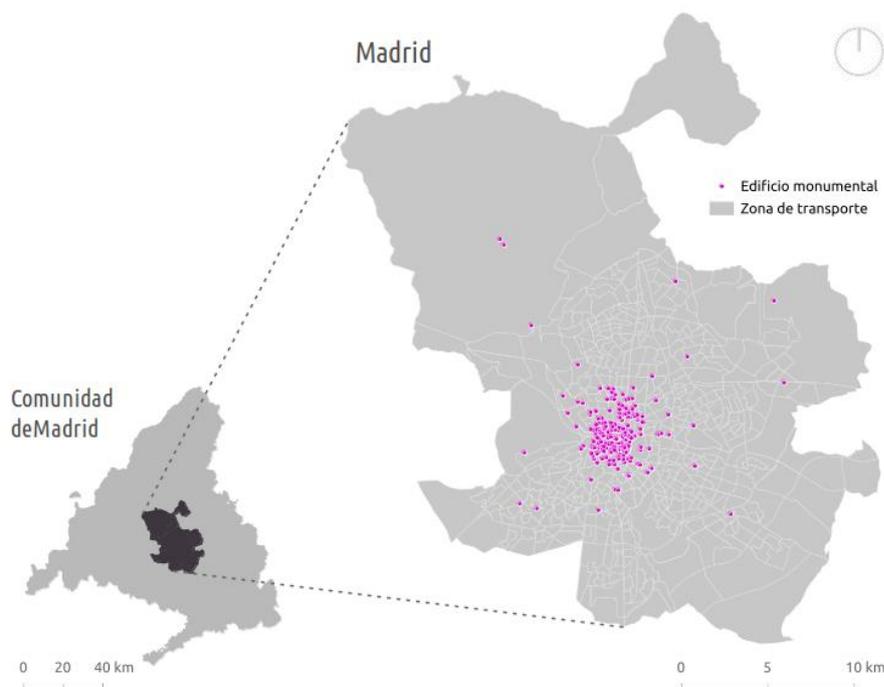


Figura 23. Área de estudio.

2.2. Datos

Los datos de telefonía que utilizamos son, por una parte, matrices origen-destino y, por otro, datos de presencia derivados de los primeros. Los datos en dichas matrices son anónimos y para el periodo de investigación de dos semanas: 14-20 de febrero de 2020 y 13-19 de febrero de 2022. Esta información es fruto del acuerdo entre la empresa Nommon y el operador Orange España, que opera con una cuota de mercado superior al 20% en España, y que se comercializan bajo la denominación de Mobility Insights (Burrieza-Galán et al., 2022; Nommon, 2023). A partir del porcentaje de cuota de mercado de la operadora, se levanta el conjunto de datos para toda la población objetivo a través del padrón municipal. La solución Mobility Insights procesa datos geolocalizados y anonimizados basados en redes celulares generados a partir de las interacciones del teléfono móvil con el operador de red, mediante interacciones activas (como llamadas de voz o uso de Internet) y eventos pasivos (como cambios en la antena de cobertura o ejecución de apps). Estas interacciones (con una frecuencia mínima de 30 minutos) ofrecen la posición aproximada de los usuarios, refinada mediante un algoritmo probabilístico basado en información sobre el uso del suelo. Dicho método asigna a los usuarios a diferentes zonas de transporte, permitiendo la construcción de matrices origen-destino (Burrieza-Galán et al., 2022).

Un registro en la matriz origen-destino muestra todos los viajes registrados en una hora entre dos zonas de transporte diferentes de entre las 1.171 zonas existentes en la Comunidad de Madrid, junto con una estimación de las distancias globales recorridas en kilómetros. Cada registro incluye campos de fecha, periodo horario (de PH00 a PH23), código de zona de transporte donde se inician y finalizan los viajes, país del usuario, código postal (en el caso de los usuarios españoles), y el nivel de renta dividido en cuatro grupos (I0 es inferior a 7.000 euros anuales; I1 es inferior a 10.000 euros; I2 es inferior a 12.000 euros; I3 es inferior a 15.000 euros; e I4 es igual o superior a 15.000 euros), en función de la renta media asociada a cada sección censal de residencia. La información sobre edad y sexo aparece agregada en cuatro grupos (0-25, 25-45, 45-

65, y 65-100 años), y es proporcionada por el operador de red móvil únicamente para residentes nacionales. En el caso de población extranjera, no se incluyen los datos de las variables socioeconómicas. En lo que respecta al país del usuario, aparecen de forma específica los siguientes países: Bélgica, Francia, Alemania, Irlanda, Italia, Países Bajos, Países Nórdicos, Portugal, Rusia, Reino Unido y, para el resto de países vienen agrupados a nivel europeo como “Resto de Europa” y para fuera de Europa como “Resto del mundo”.

2.3. Metodología

En el primer paso, procesamos los archivos CSV que contienen los datos del teléfono móvil y los almacenamos en una base de datos PostgreSQL utilizando Python. Esta base de datos nos permite utilizar la extensión PostGIS para realizar consultas basadas en la ubicación. A continuación, acotamos las matrices origen-destino a: (a) los periodos concretos objeto de estudio; y (b) las zonas de transporte asociadas al municipio de Madrid (584 en total).

A continuación, analizamos los datos de telefonía móvil de dos formas distintas: a nivel de presencia de turistas en las distintas zonas de transporte; y a nivel de flujo de viajes entre las zonas de transporte. Respecto a la presencia, nos permite examinar patrones relativos a qué zonas son más visitadas y cuándo son frecuentadas. A nivel de flujo, generamos líneas de flujo que conectan los orígenes y los destinos, teniendo en cuenta los centroides de las zonas de transporte. Estas líneas de flujo proporcionan una visión de la dinámica espacial de los turistas.

Además, analizamos los cambios tanto en la presencia como en la dinámica de los turistas tras un evento disruptivo como es la COVID-19, lo que permite evaluar los cambios en las dinámicas espacio temporales en las visitas de los turistas a la ciudad de Madrid.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos muestran una fuerte presencia de turistas en la ciudad de Madrid procedentes de Alemania, Francia y Reino Unido (Figura 2). Dicha presencia tuvo un impacto negativo por la COVID-19, dando lugar a que la presencia de turistas disminuyese de forma generalizada para todos los países de procedencia.

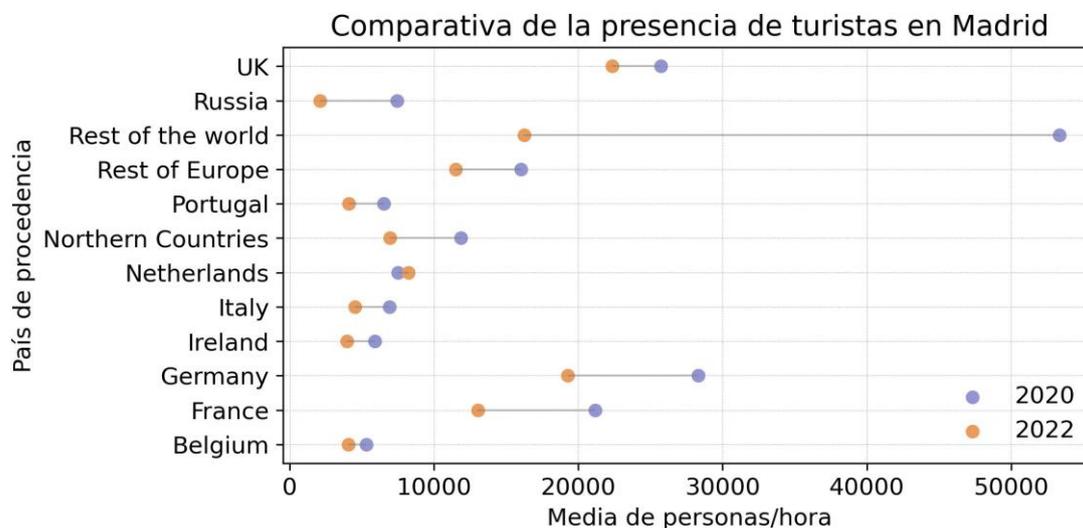


Figura 24. Variación en la presencia de turistas según el país de procedencia.

Estos cambios en la presencia de turistas tuvieron su reflejo también a nivel espacial (Figura 3) pudiéndose apreciar dicha disminución de forma generalizada en el año 2022, pero sobre todo en aquellas zonas de transporte en las que la presencia de turistas era más acentuada, como las zonas del distrito centro o la correspondiente al Aeropuerto de Barajas.

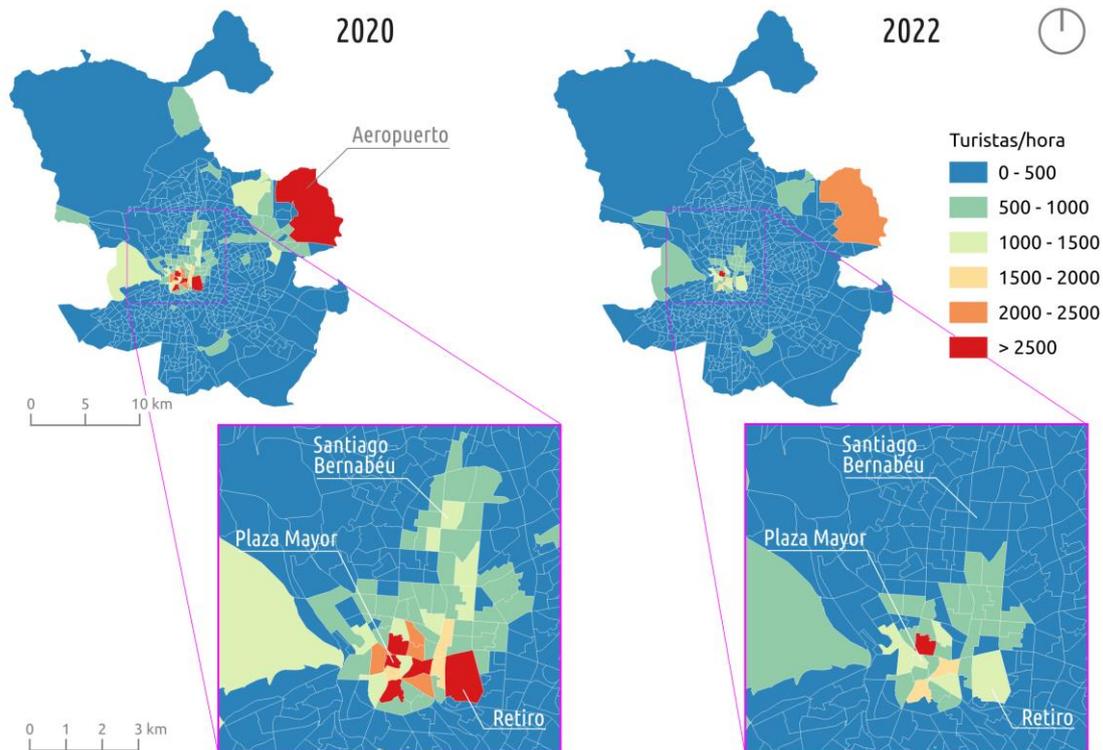


Figura 25. Distribución espacial de la presencia de turistas (personas/hora).

Los datos de las matrices origen-destino permiten analizar los patrones espaciotemporales de trayectos de los turistas a un destino específico. A modo de ejemplo, se puede apreciar en la Figura 4 cómo los trayectos de turistas al parque de El Retiro varían según el país de origen. En 2020, los turistas alemanes, británicos e italianos visitaron con mayor frecuencia la zona del parque de El Retiro en fin de semana siendo su pico el sábado, mientras que los turistas franceses mostraron un patrón de visitas con dos picos uno en jueves y otro en sábado. Sin embargo, este patrón cambia en el año 2022, donde la preferencia en las visitas al parque de El Retiro tuvo lugar preferentemente en jueves y viernes.

Además de los patrones semanales, se aprecian diferencias en la distribución de trayectos a lo largo del día según el país de origen. En 2020, los turistas alemanes, británicos y franceses mostraron un pico de trayectos a las 13 horas, mientras que los turistas italianos concentraron de trayectos una hora más tarde (14 horas). En 2022, este patrón se modificó dando lugar a una demora de la hora pico de trayectos con destino El Retiro de los turistas.

Atendiendo a la distancia media recorrida por los turistas de manera general, se puede apreciar cómo la media de distancia recorrida está por debajo de los 5 km, aunque registrando ciertas diferencias según el país de procedencia. Los turistas que más distancia media recorrieron en sus trayectos fueron los provenientes de los países del norte, los belgas y los neerlandeses. Esta distancia media en los trayectos también cambió a raíz de la COVID-19, pudiéndose apreciar cómo disminuyó de forma generalizada la distancia media recorrida, con la excepción de los trayectos efectuados por los turistas portugueses y del resto de países del mundo, cuya media aumentó respecto al año 2020.

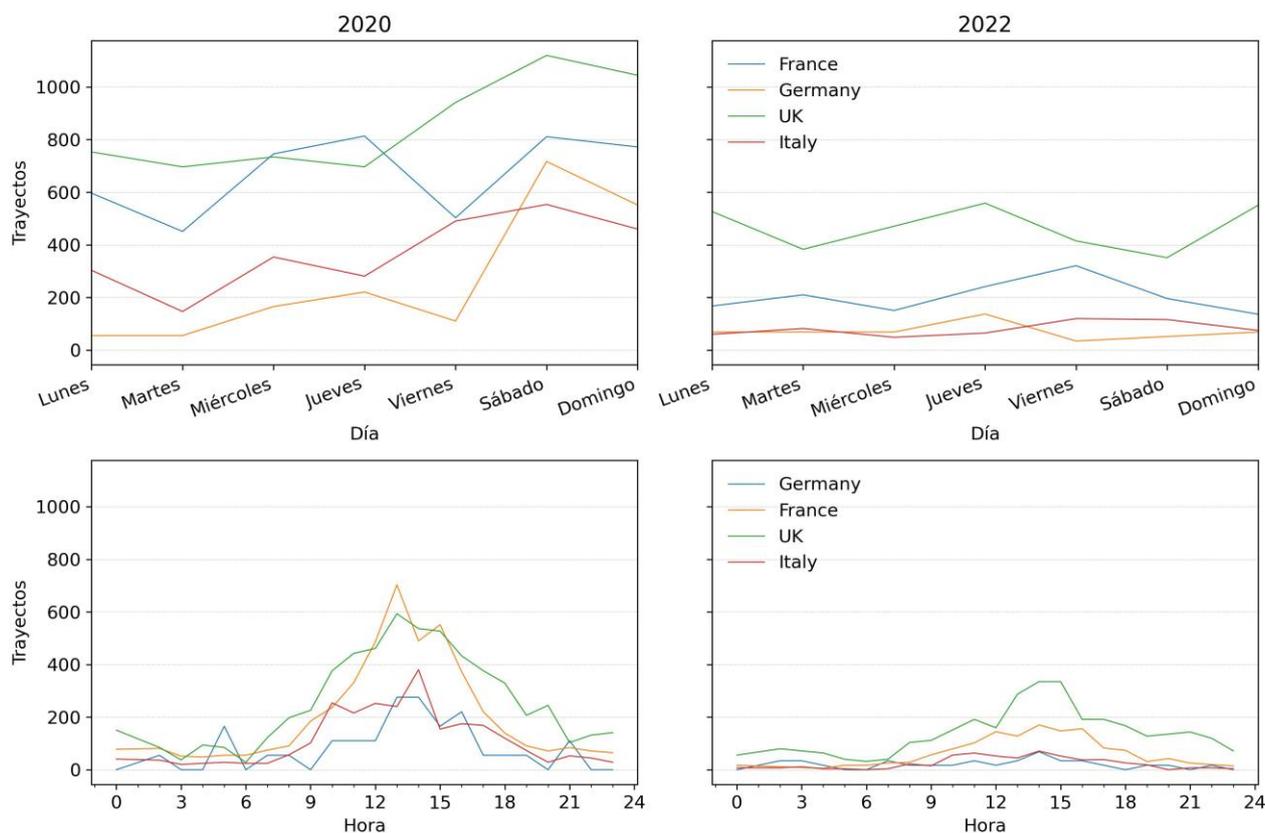


Figura 26. Patrones temporales de trayectos con destino el parque de El Retiro.

4. CONCLUSIONES

El uso de datos provenientes de telefonía móvil permite tener una imagen más representativa del origen del turista y de los patrones de movilidad que realiza durante su visita a la ciudad de Madrid con una alta precisión tanto espacial como temporal. El conocimiento de estas dinámicas turísticas es de gran importancia tanto para el sector turístico como para la administración. Por una parte, permite al sector turístico conocer qué zonas y horarios son más frecuentadas por los turistas, pudiendo así llevar a cabo estrategias de orientación de sus productos y servicios. Asimismo, las agencias de turismo pueden diseñar diferentes rutas turísticas por la ciudad. Por otra parte, permite a la administración identificar zonas prioritarias de asignación de recursos para adecuar el diseño urbano a la presencia de turistas, gestionar la saturación sobre determinadas zonas en determinadas horas o gestionar flujos mediante rutas turísticas alternativas, entre otras.

Si bien los datos de telefonía móvil son un gran avance en las investigaciones geográficas y en particular en las relacionadas con el turismo, estos datos presentan ciertas limitaciones que deben tenerse en cuenta. En primer lugar, los datos utilizados no permiten la caracterización socioeconómica de los turistas extranjeros, impidiendo conocer el tipo de perfil de gasto que puede tener como turista y el tipo de lugares que puede frecuentar, por lo que sería necesario que se complementase con otras fuentes de datos como las compras mediante tarjetas bancarias. Por otra parte, estos datos tienen margen de mejora en su precisión espacial lo que impide tener una visión de las rutas que toma para llegar a los lugares más emblemáticos de la ciudad. Esta cuestión puede ser resuelta en un futuro con la utilización de forma complementaria de datos GPS de las aplicaciones móviles.

AGRADECIMIENTOS

Esta publicación es parte del proyecto de I+D+I PID2021-127499OB-I00 (Tour-Mobility) financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033/ y "FEDER Una manera de hacer Europa".

5. BIBLIOGRAFÍA

- Batty, M. (2013). Big data, smart cities and city planning. *Dialogues in Human Geography*, 3(3), 274-279. <https://doi.org/10.1177/2043820613513390>
- Burrieza-Galán, J., Jordá, R., Gregg, A., Ruiz, P., Rodríguez, R., Sala, M. J., Torres, J., García-Albertos, P., Cantú Ros, O. G., & Herranz, R. (2022). A methodology for understanding passenger flows combining mobile phone records and airport surveys: Application to Madrid-Barajas Airport after the COVID-19 outbreak. *Journal of Air Transport Management*, 100, 102163. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2021.102163>
- García-Palomares, J. C., Gutiérrez, J., & Mínguez, C. (2015). Identification of tourist hot spots based on social networks: A comparative analysis of European metropolises using photo-sharing services and GIS. *Applied Geography*, 63, 408-417. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2015.08.002>
- Girardin, F., Fiore, F. D., Ratti, C., & Blat, J. (2008). Leveraging explicitly disclosed location information to understand tourist dynamics: A case study. *Journal of Location Based Services*, 2(1), 41-56. <https://doi.org/10.1080/17489720802261138>
- Gutiérrez, J., García-Palomares, J. C., Romanillos, G., & Salas-Olmedo, M. H. (2017). The eruption of Airbnb in tourist cities: Comparing spatial patterns of hotels and peer-to-peer accommodation in Barcelona. *Tourism Management*, 62, 278-291. <https://doi.org/10.1016/j.tourman.2017.05.003>
- Nommon. (2023). *Nommon | Big data and artificial intelligence for a sustainable future*. Nommon. <https://www.nommon.es/>
- Salas-Olmedo, M. H., Moya-Gómez, B., García-Palomares, J. C., & Gutiérrez, J. (2018). Tourists' digital footprint in cities: Comparing Big Data sources. *Tourism Management*, 66, 13-25. <https://doi.org/10.1016/j.tourman.2017.11.001>
- Talavera-García, R., Perez-Campaña, R., & Cara-Santana, Y. (2023). Unveiling the pandemic's impact on visits to Madrid's parks: Insights from mobile phone data analysis. *Journal of Maps*, 19(1), 2274466. <https://doi.org/10.1080/17445647.2023.2274466>

En busca de nuevas fronteras de mercantilización turística. Análisis del proceso de difusión espaciotemporal de las cadenas hoteleras de las Illes Balears, 1995-2022

M. Fuster-Uguet¹, I. Murray¹

¹ *Departament de Geografia, Universitat de les Illes Balears. Cra. Valldemossa, km.7,5., 07122 Palma (Illes Balears).*

marc.fuster@uib.cat, <https://orcid.org/0000-0002-2344-5366>

ivan.murray@uib.cat, <https://orcid.org/0000-0001-6594-8423>

RESUMEN:

En las últimas décadas, la geografía económica crítica del turismo ha puesto énfasis en la turistificación y el uso de viviendas de alquiler turístico, utilizando ampliamente las Tecnologías de Información Geográfica. Sin embargo, el estudio de la difusión espaciotemporal de las corporaciones turísticas, especialmente las hoteleras, ha sido menos explorado. Esta investigación aborda esta laguna al analizar la expansión global de las cadenas hoteleras baleares fuera del archipiélago entre 1995 y 2022, un período marcado por la globalización capitalista. Utilizando datos de la base de datos de Alimarket y otras capas de información geográfica, se estudió la ubicación de los hoteles en zonas costeras, así como en contextos administrativos y urbanos. Los resultados muestran que cuatro grandes cadenas hoteleras baleares lideran el mercado, con estrategias espaciales que son seguidas por otras cadenas menores. Además, se destaca la fuerte especialización en turismo de sol y playa, con una notable concentración en las costas españolas y caribeñas. La relevancia de este estudio radica en el hecho que las cadenas baleares se encuentran entre las más importantes del planeta, particularmente en el segmento del turismo de sol y playa. Este a su vez continúa siendo la principal fórmula de producción turística a escala planetaria.

Palabras-clave: geografía económica crítica, análisis espacio-temporal, turistificación, globalización, cadenas hoteleras

1. INTRODUCCIÓN

La geografía económica crítica se ha enfocado ampliamente en el análisis de las lógicas espaciales del capital. Desde este enfoque se entiende que el capital construye sus propios paisajes bajo el imperativo del beneficio y las lógicas de la mercantilización. El capitalismo histórico se ha desplegado mediante procesos de desarrollo geográfico desigual, lo que ha dado lugar a una división internacional del trabajo en la que los territorios desempeñan diferentes roles en la acumulación del capital (Harvey, 2014; Smith, 2010). Asimismo, cabe subrayar el hecho que estas geografías del capital son inherentemente dinámicas y sujetas al cambio. En este sentido, las sucesivas crisis del sistema mundo-capitalista han ido acompañadas de procesos de reestructuración, que, a su vez se traducen en nuevas formas de organización del capital y transformaciones en las geografías del capital. De este modo, la crisis del régimen de acumulación fordista se resolvió mediante el proceso de reestructuración que dio paso a la llamada globalización. Este cambio global se articuló políticamente con la reforma neoliberal, caracterizada por el ascenso del poder corporativo transnacional y la hegemonía del capital financiero, mientras que el papel del Estado quedaba relegado a asegurar las condiciones propicias para la reproducción del capital. Además, la revolución de las tecnologías de la información (TIC) fue clave en la expansión del capitalismo global a finales del siglo XX, permitiendo operar a escala planetaria de forma simultánea (Méndez, 1997; Dicken, 2014). La crisis financiera global de 2008 y la reciente crisis sanitaria de la COVID-19 han conllevado profundas transformaciones en las geografías del capital, entre las que destacan las turbulencias geopolíticas y la aceleración de la denominada segunda era de la información, marcada por el capitalismo digital, protagonizada por la Inteligencia Artificial y el Big Data (Robinson, 2022; Méndez, 2023).

A pesar de la extensa literatura sobre la globalización, las cadenas globales de valor y las diferentes formas de neoliberalismo, las geografías de las corporaciones transnacionales han recibido escasa atención por parte de la geografía económica crítica (Laulajainen y Stafford, 1995; Jones, 2017). El turismo ha sido una de las actividades económicas que más protagonismo ha ganado a escala global y un claro ejemplo de la globalización. Sin embargo, tal como señaló Britton (1991) la geografía crítica no había prestado suficiente atención al análisis de la turistificación. Precisamente, Debbage y Ioannides (1998) respondieron a la llamada de Britton con el objetivo de desplegar un cuerpo teórico para abordar las transformaciones de la geografía económica del turismo en el tránsito del fordismo al postfordismo. La turistificación planetaria ha sido una de las soluciones a la crisis financiera de 2008 (Murray y Cañada, 2021). La intensificación de las lógicas turísticas de acumulación del capital ha sido particularmente relevante en los espacios urbanos, destacando la hibridación entre turistificación y capitalismo de plataforma, ejemplificado en la llamada “airbnbización” (Adamiak, 2019). En paralelo a la intensificación turística, junto con los crecientes malestares sociales, se ha producido un aumento notable de los análisis críticos sobre la geografía económica de la turistificación (Mosedale, 2010; Bianchi, 2018; Gibson, 2019; Yrigoy, 2021).

A pesar que el turismo ha jugado un papel clave en el proceso de la globalización, el estudio de las lógicas espaciales de las corporaciones transnacionales turísticas no ha recibido suficiente atención. Si bien es cierto que en la década de los ochenta hubo trabajos pioneros sobre las corporaciones turísticas (Britton, 1982; Dunning y McQueen, 1982), en las décadas siguientes, justo cuando la globalización se aceleraba, la investigación sobre las corporaciones turísticas disminuyó notablemente, salvo algunas excepciones (Ramón, 2002; Buades, 2006; Blázquez y Artigues, 2019). Este trabajo tiene como objetivo analizar las lógicas espaciales de las cadenas hoteleras con matriz corporativa en las Islas Baleares que han expandido su ámbito de producción turística más allá del archipiélago.

2. METODOLOGÍA Y FUENTES

El estudio del proceso de internacionalización del capital se ha fundamentado, en gran medida, en el análisis de la Inversión Extranjera Directa (IED) (UNCTAD, 2007). Sin embargo, tal como expone Endo (2006) los flujos de inversión extranjera directa no son la principal estrategia del capital turístico en su proceso de internacionalización. Además, la proporción de IED en el sector turístico respecto al total de la IED parece no corresponderse con la presencia de las corporaciones turísticas transnacionales internacionalmente. Un ejemplo de esto son los flujos de IED turística de las Islas Baleares en el extranjero, donde Estados Unidos es el país que ha recibido la mayor proporción, con 849 millones de euros entre 1995 y 2023 (34% del total) (Secretaría de Estado de Comercio, 2023), una cifra que no se corresponde con los establecimientos de las cadenas baleares en ese país.

Por otro lado, si consideramos que el valor turístico deriva del trabajo (teoría del valor trabajo), resulta crucial abordar los procesos espaciales de la producción turística. Es decir, la mercantilización turística del espacio. Además, la localización de la producción turística es un elemento clave en la formación de rentas diferenciadas (Yrigoy, 2021). El avance en las Tecnologías de Información Geográfica (TIG) y la disponibilidad de Big Data ha permitido recientemente ampliar el análisis espacial del turismo global (Adamiak y Szyda, 2022) y de la mercantilización turística de la vivienda (Adamiak, 2019), entre otros fenómenos. Estos trabajos se despliegan a un nivel de detalle que hasta hace poco tiempo resultaba cuasi imposible. Por este motivo esta investigación se centra en estudiar el proceso de difusión espaciotemporal de las cadenas hoteleras baleares desde los años noventa hasta la actualidad, con el objetivo de determinar los principales patrones geográficos de las corporaciones hoteleras. A diferencia de otros estudios sobre la geografía económica crítica turística que se fundamentan en estudios teórico-cualitativos, aquí se aplica un enfoque radical cuantitativo utilizando herramientas TIG combinadas con un marco teórico de la geografía económica crítica (Wyly, 2011).

Para llevar a cabo la investigación, se ha utilizado a una fuente que no está diseñada para llevar a cabo estudios académicos ni mucho menos el análisis espacial. Nos referiremos a los catálogos de las empresas hoteleras españolas publicados por *Alimarket*, bajo los títulos *Anuario de la Hostelería*, *Informe anual hoteles, restauración, turismo y ocio*, *Alimarket bases de datos: Hoteles y restauración*. Se recopilaron los anuarios de los años 1996, 2006, 2012, 2016, 2020 y 2023- que presentan datos del año anterior a su publicación-. Esta secuencia permite abordar el proceso de difusión de las cadenas desde el momento en que se intensifica la globalización turística y las crisis de 2008 y de la pandemia. Se han seleccionado las cadenas de matriz balear que operan fuera del archipiélago, tanto en otras regiones de España como en otros países. Una vez transcrita esa información en una base de datos, se ha procedido a georreferenciar todos los hoteles. Es importante destacar que esta secuencia de datos ha sido posible gracias a quince años de recopilación y georreferenciación de dicha información. A diferencia de otros trabajos que han abordado la difusión espaciotemporal del

alojamiento turístico (Pons et al., 2014; Almeida-García et al., 2018), en este caso se distingue por corporación hotelera y tipo de explotación, además de las características propias del establecimiento.

El desarrollo de representaciones gráficas que captaran adecuadamente un fenómeno global a partir de datos geográficos puntuales con un elevado nivel de detalle y múltiples atributos ha supuesto un enorme desafío. La geodatabase creada incluye información detallada, como el año, nombre de la cadena hotelera, nombre del establecimiento, tipología, categoría, número de habitaciones, régimen de explotación, coordenadas geográficas, proximidad al litoral (definida mediante un buffer de 1 km), ubicación en ciudad (sí/no), así como municipio, región y país. Esta combinación de técnicas permitió una comprensión más profunda de la evolución y expansión espacial de las cadenas hoteleras en un contexto global.

Para el análisis y representación de la información, se emplearon técnicas como el análisis de densidad Kernel en el Sistema de Información Geográfica de Esri (ArcMap), un método ampliamente reconocido para estudiar la distribución espaciotemporal de la actividad turística (Blázquez-Salom et al., 2023; Brandt et al., 2017; Zuo et al., 2021). Además, se utilizó el paquete Plotly de RStudio (Perkel, 2018) para visualizar los datos en tres dimensiones, lo que permitió analizar la información considerando las dimensiones espacial, temporal y de magnitud (medida en miles de habitaciones), como se muestra en la Figura 2.

3. LA GLOBALIZACIÓN DEL CAPITAL TURÍSTICO BALEAR, 1995-2022

Entre 1995 y 2019 el número de cadenas hoteleras que operaban fuera del archipiélago ha incrementado notablemente, pasando de 21 compañías el 1995 a 43 el 2022. Durante este período, estas cadenas pasaron de controlar 518 establecimientos (122 mil habitaciones) en 1995 a 1291 establecimientos (356 mil habitaciones) en 2022 (ver figura 1). Es importante destacar que, aunque más cadenas han expandido sus operaciones, aproximadamente el 61,7% de las habitaciones están controladas por solo cuatro grandes cadenas: Meliá International Hotels, Riu Hotels, Grupo Barceló e Iberostar. Estas compañías lideran la expansión del sector, estableciendo un camino que las pequeñas y medianas cadenas siguen posteriormente, en una estrategia conocida comúnmente como “seguir al líder” (*follow the leader*).

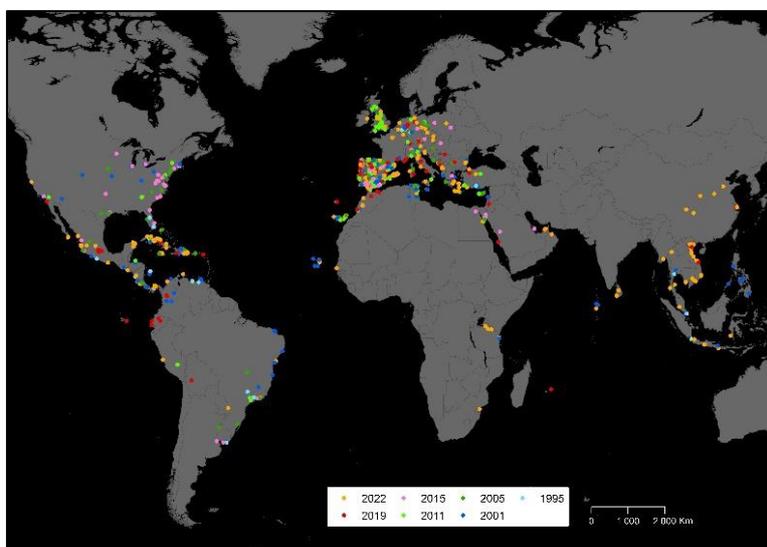


Figura 27. Establecimientos de las cadenas hoteleras de matriz balear, 1995-2022 (Fuente: elaboración propia a partir de base de datos Hostelmarket).

La mayoría de los análisis sobre la localización de las corporaciones hoteleras se centran principalmente en los países donde operan, sin atender demasiado a las particularidades territoriales, es decir, a las localizaciones concretas dentro de esos países. A partir de los datos expuestos en la tabla 1 se pueden destacar algunas cuestiones. En primer lugar, España sigue siendo la principal zona de producción turística de las cadenas baleares. Aunque su presencia en España casi se ha duplicado, la capacidad productiva en España ha disminuido en términos porcentuales, pasando del 72,47% de sus habitaciones en 1995 al 47,65% en 2022. Esto significa que las corporaciones han intensificado su proceso de internacionalización durante este período. En segundo lugar, cabe destacar el papel que juega la región caribeña como frontera de mercantili-

ción turística del capital balear. En México, República Dominicana y Cuba se concentra el 27,61% de las habitaciones de las cadenas hoteleras. No obstante, si nos centramos en el papel que estos tres países juegan respecto del total de habitaciones de las cadenas baleares en el extranjero, resulta que en el año 2022 concentraban el 52,74% de las habitaciones. En tercer lugar, en el resto del mundo han aumentado constantemente en su presencia, alcanzando el 23,87% de las habitaciones en 2022. Este grupo de países han experimentado los mayores incrementos relativos desde la crisis de 2008, con un crecimiento del 34,86% entre 2010 y 2022, en comparación con la media global del 21,31%. Esto sugiere que, aunque estos países no representan la mayor parte de la capacidad productiva, están emergiendo como nuevas fronteras de mercantilización para el capital balear.

Tabla 1. Evolución de la difusión espaciotemporal de la planta hotelera de las cadenas baleares (datos de países en porcentaje respecto del total de habitaciones), 1995-2022 (Fuente: elaboración propia a partir de base de datos Hostelmarket).

	1995	2001	2005	2010	2015	2019	2022
España (%)	72,47	58,12	53,36	48,26	47,55	48,37	47,65
México (%)	3,60	6,06	8,44	10,10	10,55	10,95	10,61
Rep. Dominicana (%)	7,80	8,47	8,50	9,22	9,59	9,56	8,55
Cuba (%)	4,25	5,03	5,28	6,94	7,27	8,35	8,45
EE.UU. (%)	0,95	2,04	3,31	4,01	4,03	0,70	0,87
Resto del mundo (%)	10,93	20,28	21,10	21,47	21,01	22,07	23,87
Total (Habitaciones)	123.454	224.599	255.685	293.902	310.125	347.777	356.550

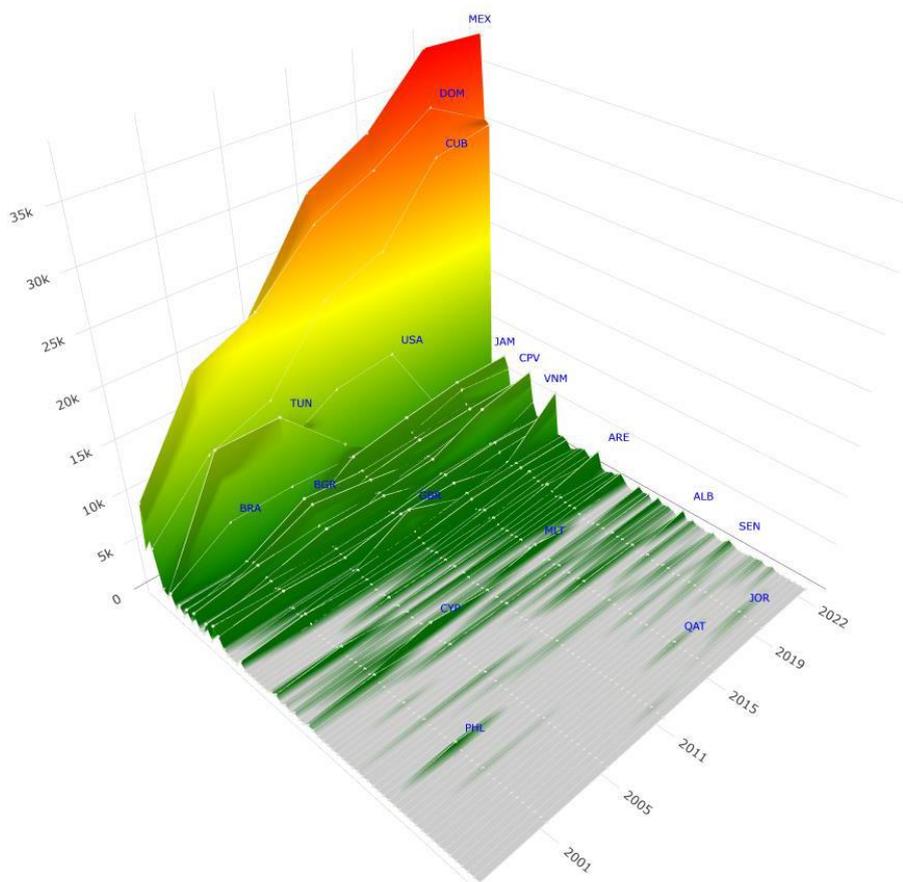


Figura 2. Expansión de la planta de alojamiento de las cadenas hoteleras baleares por países (sin contar España), 1995-2022 (unidad: miles de habitaciones) (Fuente: elaboración propia a partir de bases de datos Hostelmarket).

En la figura 2 se puede observar la evolución epaciotemporal del alojamiento controlado por cadenas baleares fuera de España, diferenciando las tendencias particulares en cada país. Tal como se ha comentado anteriormente, destacan las tendencias ascendentes de México, República Dominicana y Cuba. En el caso de República Dominicana, se nota una disminución entre 2019 y 2022, que no está relacionada con la crisis de la COVID-19, sino con la división de la Cadena Mar en dos entidades: Mar Hoteles y Majestic Resorts. Esta última se hizo cargo de los alojamientos en el Caribe y ahora es propiedad del Tyche Group. En cuanto a los países que han experimentado una reducción notable en el número de habitaciones controladas por cadenas baleares, destacan Túnez, Estados Unidos y Reino Unido. En Túnez, la caída se produce particularmente después de los ataques terroristas en Hammamet en junio de 2015, lo que llevó a la salida de la cadena Riu. La disminución del número de habitaciones en los EE.UU. se debe fundamentalmente a cambios corporativos del grupo Barceló que tras adquirir el 100% de Crestline Hotels & Resorts, empezó a operar hoteles bajo otras marcas como Hilton, Hyatt o Marriott, por lo que estos hoteles ya no aparecen en su cartera. En Reino Unido, la salida del Grupo Barceló en 2012, motivada por la crisis de 2008 y la dificultad de renegociar las rentas con el propietario de los hoteles, Puma Hotels PLC, también contribuyó a esta reducción. Por otro lado, se pueden identificar países donde se está expandiendo la frontera de mercantilización turística, ya sea en regiones turísticas consolidadas como el Caribe, con la expansión en Jamaica, o en resorts costeros de la Europa del Este, especialmente durante la primera década del siglo XXI, justo antes de la crisis de 2008. Más recientemente, se ha activado la expansión hacia Asia, destacando especialmente Vietnam.

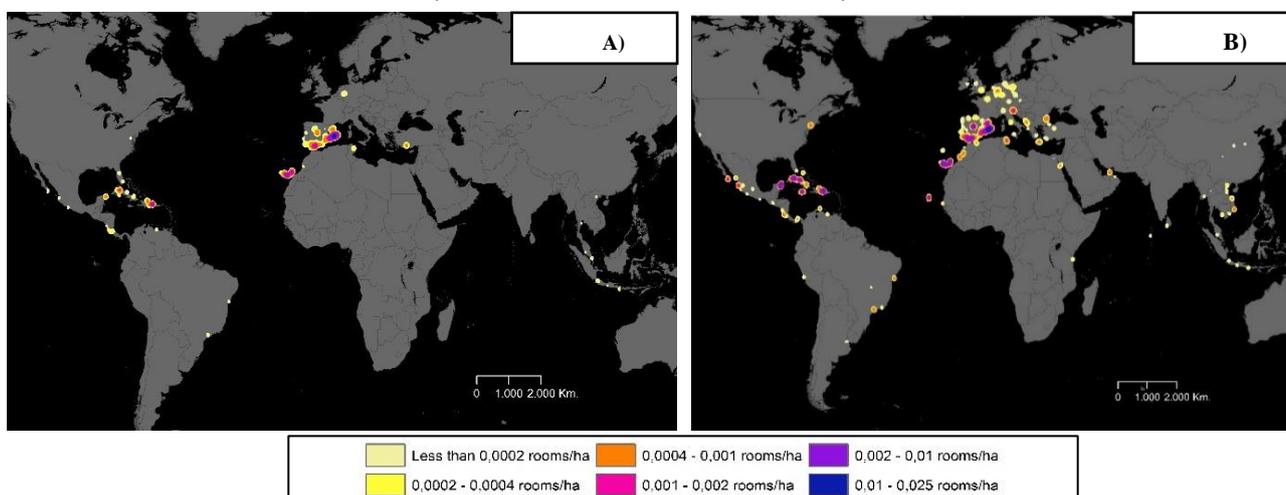


Figura 3. Mapa de densidad kernel del alojamiento turístico de las cadenas hoteleras baleares, 1995-2022 (unidad: habitaciones/hectárea) (Fuente: elaboración propia a partir de bases de datos Hostelmarket).

En los mapas de densidad kernel para los años 1995 y 2022 (figura 3) se pueden identificar los siguientes patrones geográficos que permiten profundizar en el análisis de las localizaciones concretas, pudiéndose apreciar los procesos de concentración espacial y, con ellos, la relevancia de las rentas de localización. En primer lugar, destaca el profundo carácter litoral de la mayoría de los establecimientos con una media del 65% de las habitaciones ubicados en el rango del primer kilómetro de costa (buffer de 1 km). Este resultado refleja lo que Joan Buades (2006) acuñó como “exportando paraísos”. En segundo lugar, ya en 1995 estaban claramente definidas las principales áreas de producción turística, situadas en los archipiélagos balear y canario, en el litoral mediterráneo español, y en las islas del Caribe -concentrándose en los municipios de La Altagracia en República Dominicana, Matanzas en Cuba, y Quintana Roo en México-. La presencia del capital en estos municipios se ha intensificado a lo largo del período analizado, como se puede observar en el mapa de 2022. En tercer lugar, durante el proceso de ampliación de las fronteras de mercantilización turística, el capital balear se ha extendido hacia nuevos territorios, destacando la penetración en nuevas periferias de sol y playa. Se observa una preferencia por espacios insulares con la incorporación de Cabo Verde, Madeira, Creta, Maldivas, Sri Lanka o Indonesia (Bali y Yakarta). También es destacable la incorporación de resorts turísticos costeros relativamente próximos a los países centroeuropeos, como las costas del norte de África -Agadir en Marruecos y Susa en Túnez - y Mediterráneo oriental -Nesebar en Bulgaria y Grad Umag en Croacia-. En cuarto lugar, las cadenas hoteleras baleares han ido ganando peso en ciudades, particularmente en las estadounidenses y europeas. En todo caso, debe tenerse en cuenta que las tres principales ciudades en cuanto a número de habitaciones son Madrid, Barcelona y Sao Paulo. Además, muchos de esos hoteles se localizan en ciudades costeras, hibridizando turismo urbano con sol y playa. A pesar de esto, las habitaciones

en ciudades representan tan solo el 18% del total y destaca, además, que el 60% de esa oferta pertenece a Meliá Hotels International. Finalmente, las nuevas fronteras se desplazan hacia el Este en paralelo con el movimiento del capitalismo global, subrayando la incorporación de los Emiratos Árabes y países asiáticos, como la zona de Nha Trang en Vietnam conocida como la “Ibiza asiática”.

4. CONCLUSIONES

La investigación ha permitido visibilizar la expansión de las corporaciones hoteleras de matriz balear fuera del archipiélago. Esta expansión, que comenzó en los años setenta como respuesta del poder corporativo ante la crisis de 1973, ha sido incesante, centrada principalmente en la producción turística de sol y playa. En aquel contexto, unas pocas cadenas hicieron el salto a zonas costeras de la península y Canarias manifestando que esa fórmula permitía abaratar costos, reducir las fricciones derivadas por conflictos laborales que ya tenían lugar en las Baleares, y asegurarse una ampliación de nicho de mercado para poder afrontar mejor futuras crisis. Además, ese salto espacial, y los sucesivos, han permitido resolver los problemas de sobreacumulación del capital, actuando a modo de soluciones espaciotemporales a las crisis. Se ha observado una elevada concentración de las cadenas hoteleras en áreas costeras, especialmente en el litoral español y caribeño, reflejando la importancia de las rentas de localización en las estrategias de expansión. Se trata de unas lógicas espaciales que se caracterizan por una elevada concentración, reflejando la relevancia de las rentas de localización. En este contexto, las cuatro principales cadenas hoteleras (Melia International Hotels, Riu Hotels, Grupo Barceló, Iberostar) dominan el sector, guiando la expansión que luego es seguida por pequeñas y medianas cadenas en una estrategia de “seguir al líder”. Cabe señalar que una de las principales limitaciones de este estudio es la falta de un análisis más detallado de las lógicas espaciales diferenciadas por cada cadena. Sin embargo, esta laguna se podrá abordar en futuras investigaciones utilizando la geodatabase elaborada. Finalmente, Las TIG han demostrado ser herramientas cruciales para representar y analizar los procesos de globalización corporativa en el sector turístico, aportando evidencia de que el espacio y la geografía son factores determinantes en la expansión del capital turístico.

AGRADECIMIENTOS

“Esta publicación es resultado de la ayuda (PREP2022-000948) y es parte del proyecto I+D+i PID2022-137648OB-C21 financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033, por el FSE+ y FEDER Una manera de hacer Europa”

5. BIBLIOGRAFIA

- Adamiak, C. (2019). Current state and development of Airbnb accommodation offer in 167 countries. *Current Issues in Tourism*, 25(19), 3131–3149. <https://doi.org/10.1080/13683500.2019.1696758>
- Adamiak, C., & Szyda, B. (2022). Combining Conventional Statistics and Big Data to Map Global Tourism Destinations Before COVID-19. *Journal of Travel Research*, 61(8), 1848-1871. <https://doi.org/10.1177/00472875211051418>
- Almeida-García, F., Cortés Macías, R., Gallegos Reina, A., & Schenkel, E. (2018). Patrones de localización y evolución hotelera: el caso de Torremolinos. *Boletín De La Asociación De Geógrafos Españoles*, (79). <https://doi.org/10.21138/bage.2535a>
- Artigues, A.A. y Blázquez, M. (2019). “Empresas multinacionales turísticas”. En Cañada, E. y Murray, I. (Eds.) *Turistificación global: perspectivas críticas en turismo* (pp. 199-224). Barcelona, Icaria.
- Bianchi, R. (2018). The political economy of tourism development: A critical review. *Annals of Tourism Research*, 70, 88–102. <https://doi.org/10.1016/j.annals.2017.08.005>
- Blázquez Salom, M., Artigues Bonet, A. A., y Murray Mas, I. (2011). La balearización global: el capital turístico en la minoración e instrumentación del Estado. *Investigaciones Turísticas*, (2), 1–28. <https://doi.org/10.14198/IN-TURI2011.2.01>
- Brandt, T., Bendler, J., y Neumann, D. (2017). Social Media Analytics and Value Creation in Urban Smart Tourism Ecosystems. *Information & Management*. 54. <https://doi.org/10.1016/j.im.2017.01.004>.
- Britton, S. (1982). “International tourism and multinational corporations in the Pacific: the case of Fiji”. En M. Taylor y N. Thrift, N. (eds) *The geography of multinationals* (pp.252-274). Croom Helm, Londres,.
- Britton, S.G. (1991). Tourism, capital and place: towards a critical geography of tourism. *Environmental and Planning D: Society and Space*, 9(4), 451-478. <https://doi.org/10.1068/d0904>

- Buades, J. (2006). *Exportando paraísos. La colonización turística del planeta*. Palma, La Lucerna.
- Debbage, K. y Ioannides, D. (Eds.) (1998). *The Economic Geography of the Tourist Industry A Supply-Side Analysis*. Londres, Routledge.
- Dicken, P. (2014). *Global Shift: Mapping the Changing Contours of the World Economy*. Londres. SAGE.
- Endo, K. (2006). Foreign direct investment in tourism- flows and volumes. *Tourism management*, 27 (4), 600-614. <https://doi.org/10.1016/j.tourman.2005.02.004>
- Gibson, C. (2019). Critical tourism studies: New directions for volatile times. *Tourism Geographies*, 1–19. <https://doi.org/10.1080/14616688.2019.1647453>
- Harvey, D. (2014). *Diecisiete contradicciones y el fin del capitalismo*. Madrid, Traficantes de Sueños.
- Jones, A. (2017). "The Corporation in Geography". En G. Baars y A. Spicer (Eds.), *The Corporation. A Critical, Multi-Disciplinary Handbook* (pp. 160-179). Cambridge, Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781139681025.008>
- Laulajainen, R. y Stafford, H.A. (1995). *Corporate Geography. Business Location Principles and Cases*. Springer, Dordrecht. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-1181-4>
- Méndez, R. (1997). *Geografía económica. La lógica espacial del capitalismo global*. Ariel, Barcelona.
- Mosedale, J. (Ed.) (2010). *Political economy of tourism*. Londres, Routledge.
- Perkel, J. (2018). Data visualization tools drive interactivity and reproducibility in online publishing. *Nature*. 554, 133-134. <https://doi.org/10.1038/d41586-018-01322-9>.
- Pons, A., Rullán, O., y Murray, I. (2014). Tourism Capitalism and Island Urbanization: Tourist Accommodation Diffusion in the Balearics, 1936-2010. *Island Studies Journal*, 9(2), 239–258. <https://doi.org/10.24043/001c.81625>
- Ramón, A.B. (2002). *La expansión del sector hotelero español*. València, CAM.
- Robinson, W.I. (2022). *Global Civil War: Capitalism Post-Pandemic*. PM Press/Kairos, Oakland.
- Secretaría de Estado de Comercio (2023, 6 de agosto). Data Invex. Inversión Española en el Exterior. <http://datainvex.comercio.es/>
- Smith, N. (2010). *Desarrollo desigual. Naturaleza, capital y la producción del espacio*. Traficantes de Sueños, Madrid.
- UNCTAD (2007). *FDI in Tourism: The Development Dimension*. New York, United Nations. https://unctad.org/system/files/official-document/iteiia20075_en.pdf
- Wyly, E. (2011). Positively Radical. *International Journal of Urban and Regional Research*, 35(5), 889–912. <https://doi.org/10.1111/j.1468-2427.2011.01047.x>
- Yrigoy, I. (2021). Strengthening the political economy of tourism: profits, rents and finance. *Tourism Geographies*, 25(2–3), 405–424. <https://doi.org/10.1080/14616688.2021.1894227>
- Zuo, Y., Chen, H., Pan, J., Si, Y., Law, R., & Zhang, M. (2021). Spatial distribution pattern and influencing factors of sports tourism resources in China. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(7), 428. <https://doi.org/10.3390/ijgi10070428>

Análisis geomorfométrico de las cuencas de drenaje de Menorca (Islas Baleares)

A. Moragues^{1,2}, M. Ruiz-Pérez^{1,2,3}, J. Estrany^{1,2}

¹ Observatorio de Riesgos Naturales y Emergencias de les Illes Balears -RiscBal. Centre Bit Raiguer, 07300, Inca (Illes Balears).

² Departamento de Geografía de la Universitat de les Illes Balears. 07122, Palma (Illes Balears).

³ Servicio de Sistemas de Información Geográfica y Teledetección -SSIGT. Universitat de les Illes Balears. 07122, Palma (Illes Balears).

alexandre.moragues@uib.cat, <https://orcid.org/0000-0002-2035-5509>

maurici.ruiz@uib.cat, <https://orcid.org/0000-0002-5440-214X>

joan.estrany@uib.cat, <https://orcid.org/0000-0003-3669-9936>

RESUMEN: Los parámetros geomorfométricos en combinación con las coberturas del suelo de las cuencas, permiten conocer y analizar las causas del desarrollo de la red de drenaje y su comportamiento. Desde una perspectiva de la Geografía del riesgo, conocer estas características puede suponer la identificación de aquellas cuencas con un mayor riesgo de inundación. En este trabajo se calculan hasta 43 parámetros morfométricos de las cuencas y su red de drenaje, juntamente con las coberturas del suelo, las litologías, y sus descripciones. Estos parámetros se han calculado para las 80 cuencas de la isla de Menorca y se han analizado las 44 cuencas de más de 2 km². Menorca es la segunda isla mayor del archipiélago Balear y tiene una superficie de 693 km². Geológicamente se encuentra dividida en dos mitades: la vertiente del sur con litologías más permeables; y la vertiente del norte con litologías impermeables. El análisis se ha llevado a cabo mediante la clasificación por *Principal Component Analysis*, y se han agrupado a partir de dichas clases utilizando *K-Means*, obteniendo 7 agrupaciones de cuencas en base a su medida, desarrollo de la red de drenaje, pendientes, coberturas del suelo, características litológicas y sistema geológico. Las litologías son el gran condicionante del desarrollo de la red de drenaje, la cual condiciona el riesgo de la cuenca, y los limos, arcillas y pizarras del Paleozoico son los materiales donde más se desarrolla la red. Además, otro factor condicionante para el riesgo es la pendiente, encontrándose las cuencas y cauces con más pendiente sobre las arcillas y limos del Triásico. Finalmente, las calizas y evaporitas del Neógeno, dispuestas de forma horizontal resultan en cuencas poco desarrolladas y con pendientes bajas.

Palabras-clave: morfometría, litología, cuenca de drenaje, SIG, análisis de componentes principales.

1. INTRODUCCIÓN

Las cuencas de drenaje constituyen la unidad básica para los estudios hidrogeomorfológicos, que tienen por objetivo profundizar en el conocimiento sobre el funcionamiento de las cuencas de drenaje y sus procesos. Por su parte, la morfometría de las cuencas, entendida como el cálculo de los parámetros de forma de una cuenca, permite analizar las características, medidas, forma y configuración de una cuenca. Además, los parámetros determinantes de la cuenca influyen y confeccionan la red de drenaje superficial, condicionando la respuesta hidrológica de la cuenca. Son numerosos los estudios dentro de la literatura científica que calculan y analizan estos parámetros para distintas áreas de estudio, utilizando algunos de los parámetros más habituales definidos por Gravelius, Horton, Strahler, Miller, Schumm, o Melton, que permiten cuantificar los parámetros de la forma de la cuenca, así como las características de la red de drenaje, permitiendo la comparación entre cuencas de distintas medidas, tipologías o características.

Estos parámetros, junto con las características litogeológicas, mantienen relación con el comportamiento hidrológico de las cuencas (Basu & Pal, 2019; Karalis et al., 2014), pudiendo servir para determinar el nivel de riesgo de inundación de la cuenca, en base a sus características físicas. Además, las características físicas de las cuencas, en relación con el comportamiento hidrológico de las mismas, puede servir para extrapolar este comportamiento y mejorar las predicciones hidrológicas en cuencas no monitorizadas (Jin et al.,

2018).

El uso de herramientas SIG permite realizar análisis espaciales de forma ágil y con gran cantidad de datos, así pues es amplia la literatura científica que aplica los SIG para analizar cuencas de drenaje a partir de sus características geomorfométricas y topohidrológicas (Gaurav Singh & Singh, 2024), desde una perspectiva del riesgo de inundaciones (Elsadek & Almaliki, 2024), e incluso destacando la importancia de evaluar estos parámetros (Raja Shekar & Mathew, 2024).

En el contexto de las islas Baleares, Estrany & Grimalt (2014) han utilizado los parámetros morfométricos de las cuencas de drenaje del levante de Mallorca para analizar la evolución de las lagunas costeras en la desembocadura de estos torrentes, incorporando además, el índice de torrencialidad, como medida del riesgo de riadas. Por su parte, Gelabert et al. (2005) han analizado las cuencas de la vertiente sud de Menorca desde una perspectiva litológica y estructural. En ambos estudios, la permeabilidad de las litologías dominantes en la cuenca, se considera un factor fundamental en el desarrollo de la red de drenaje y, por ende, el riesgo de inundación de la cuenca.

El objetivo de este trabajo es la caracterización morfométrica de las cuencas de drenaje mayores de 2 km² de la isla de Menorca, y el análisis de su relación con las características litológicas, forestales, y de coberturas del suelo, todo ello desde una perspectiva de la Geografía del riesgo. Para ello, se utilizarán los Sistemas de Información Geográfica (SIG), como herramienta clave para el manejo y análisis de datos geoespaciales, y Python para el tratamiento estadístico.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

La caracterización de las cuencas de estudio se ha llevado a cabo mediante un proceso automatizado utilizando la extensión ArcPy 3.11.8 de ArcGIS Pro 3.3.1[®], aplicado a las 44 cuencas con una superficie superior a 2 km², de las 80 cuencas hidrográficas que se han caracterizado en la isla, juntamente con su red de drenaje. Tanto la red como las cuencas, y el cálculo de los parámetros se han realizado a partir de un Modelo Digital de Elevaciones de 2 m, derivado del vuelo LiDAR del PNOA (2019). La red de drenaje superficial de alto nivel de detalle se ha generado en un entorno SIG, utilizando las herramientas de dirección y acumulación de flujo. Se ha validado manualmente a partir de la ortofotografía aérea de 1956 y 2021, y se ha corregido topológicamente para poder calcular el orden jerárquico de Strahler (1952). El proceso de caracterización se divide en 4 secciones, y a continuación se indican los parámetros que se utilizan en el proceso estadístico, con la finalidad de evitar las variables redundantes que puedan sesgar los resultados.

- 1) En primer lugar, se calculan los parámetros morfométricos de la cuenca, de los cuales se han seleccionado los que aparecen en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros morfométricos de la cuenca seleccionados, calculados a partir de un DEM de 2m.

Parámetros morfométricos de la cuenca	Fórmula	Escala
Longitud	Dist. outlet - punto perímetro más alejado	1.4 - 12.8 km
Pendiente media	$Pm = (z_{max} - z_{min}) / longitud$	0.01 - 0.12 m/m
Ratio de relieve relativo	$Rr = (Z_{max} - Z_{min}) * 100 / perímetro$	0.34 - 2.99
Índice de Gravelius	$Cc = perímetro / (\sqrt{área * 0.28})$	1.42 - 2.11
Ratio de elongación	$Re = 2 / longitud * (área / \pi^{0.5})$	0.39 - 1.21
Ratio de circularidad	$Rc = (área * 4 * \pi) / (perímetro^2)$	0.22 - 0.49
Factor de forma	$Ff = área / (longitud^2)$	0.12 - 1.15
Rugosidad de Melton	$MRn = ((Z_{max} - Z_{min}) + 1000) / (longitud * 0.5)$	5.51 - 62.65

- 2) Seguidamente, a partir de la red de drenaje, se extrae el outlet de la cuenca, además de los parámetros derivados de la red que se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros morfométricos de la red seleccionados, calculados a partir de un DEM de 2m.

Parámetros derivados de la red de drenaje	Fórmula	Escala
Longitud total	$Lt = \sum L_{tramos}$	5.86 - 293.57 km
Pendiente media	$Pm = (Z_{max} - Z_{min}) / Lt$	0.01 - 0.18 m/m
Recorrido más largo del flujo		2.8 - 15.2 km
Textura de drenaje	$Dt = N_{canales} / perímetro$	1.27 - 40.57
Densidad de drenaje	$Dd = longitud\ total / área$	1.54 - 9.56
Número de infiltración	$If = Dd / (N_{canales} / área)$	2.92 - 742.75

Índice de torrencialidad	$It = (N_{\text{canales Strahler 1}} / \text{área}) * Dd$	1.48 - 383.19
Número de rugosidad	$Rn = (Z_{\text{max}} - Z_{\text{min}}) * Dd$	0.10 - 2.59
Número geométrico	$Gno = Rn / \text{pendiente media}$	0.03 - 0.22
Pendiente media de los tramos Strahler=1	$Pm_{s1} = (Z_{\text{max}_{s1}} - Z_{\text{min}_{s1}}) / Lt_{s1}$	0.01 - 0.13 m/m

3) A continuación, se calcula el porcentaje de superficie en cada cuenca ocupada por cada una de las siguientes coberturas del suelo (todos ellos incluidos en el análisis estadístico): Mapa Forestal de España (LULC) (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2012), Mapa Geológico de España a escala 1:1.000.000 (IGME, 1995), los datos del suelo del módulo LUCAS (arcilla, limos, textura, contenido de agua disponible, grueso, arena, y densidad aparente) con un ancho de píxel de 500 m (Panagos et al., 2022).

4) Finalmente, todas las tablas resultantes se exportan a CSV, para posteriormente agrupar las cuencas según sus variables morfométricas, y las coberturas del suelo, utilizando Python. Para ello se aplica el análisis de los componentes principales (*Principal Component Analysis – PCA*), y una agrupación por clústeres utilizando *K-Means*, en base a las agrupaciones generadas por el *PCA*. Para abarcar un >80% de la varianza, en este caso, se deben generar 8 componentes para el *PCA*, y según la prueba *Within Cluster Sum of Squares – WCSS*, el *K-Means* se agrupará en 7 clústeres.

2.1. Área de estudio

Menorca es la menor de las islas Gimnesias, formadas por Mallorca y Menorca, y que se sitúan al este del archipiélago Balear, con una orientación ONO-ESE (Figura 1), tiene una longitud aproximada de 48 km (desde el Pont d'en Gili hasta Punta Prima), y una anchura relativamente constante de 14 km, llegando a los 19 km (entre Sant Tomàs i el Cap de Cavalleria). Con una superficie de 693 km² y un perímetro de 307 km, es la segunda isla más grande de las Baleares, y la tercera en población, con 96.467 habitantes, por detrás de Mallorca y Eivissa.

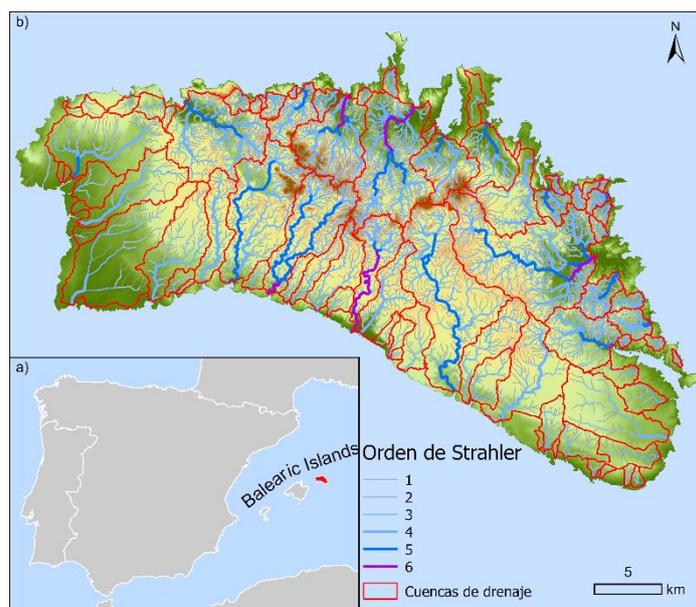


Figura 28. a) Localización de Menorca en la cuenca mediterránea occidental. b) Cuencas hidrográficas y red de drenaje de Menorca, según su orden de Strahler, a partir de un MDE de 2 metros derivado del LiDAR-PNOA de 2019.

Estratigráfica y estructuralmente, Menorca se diferencia del resto de las islas del archipiélago Balear, ya que en ésta abundan las rocas del Paleozoico y la dirección de los pliegues estructurales es N-S, mientras que en Mallorca y las Pitiüeses dominan los materiales sedimentarios del Eoceno-Oligoceno y los pliegues están alineados SO-NE (Sàbat et al., 2018). Esta disposición y las litologías que la componen, permiten dividir la isla en dos mitades siguiendo el eje longitudinal ONO-ESE: 1) la vertiente geológica meridional o *Migjorn*, desarrollada durante el Mioceno superior; y 2) la vertiente geológica septentrional o *Tramuntana*, formada entre el Devónico y el Cretáceo (Figura 2. a). Aun así, estas dos vertientes geológicas no corresponden con las vertientes hidrográficas.

2.2. Vertiente de Tramuntana

Los materiales más antiguos de la isla se encuentran en la vertiente de *Tramuntana*, que, a su vez, se divide en tres principales formaciones rocosas que condicionan el paisaje fallado del norte la isla (Sàbat et

al., 2018) (Figura 2. b). 1) La Menorca oscura, localizada en el centro y en el extremo oriental de la vertiente de Tramuntana, donde afloran los materiales más antiguos de la isla (y del archipiélago), correspondientes a depósitos del Devónico-Carbonífero (419 – 303 Ma.), compuestos predominantemente por limos negros, arcillas y pizarras, que dan el color oscuro que caracteriza estos afloramientos resedimentados. A su vez, en el eje central de la vertiente, al este de los materiales más antiguos, también afloran algunas franjas de areniscas del Cuaternario. 2) La Menorca roja se caracteriza por las litologías rojizas que están presentes a lo largo de la vertiente, y se remontan desde el Pérmico hasta el Triásico (298 – 201 Ma.), donde dominan facies Buntsandstein rojizas, sobre limos y arcillas de origen sedimentario. 3) La Menorca gris se aprecia al oeste de la vertiente de *Tramuntana* y en la franja transversal centro-oriental. Los materiales pertenecen al Jurásico y el Cretáceo (201 – 66 Ma.) En estas franjas, dominan las calizas, dolomías y margas que configuran las tonalidades grisáceas.

2.3. Vertiente de Migjorn

La vertiente de mediodía, o Menorca blanca, se separa de *Tramuntana* por una falla formada durante el Mioceno inferior. La vertiente de *Migjorn*, en la parte hundida de la falla, está formada por areniscas, calizas y evaporitas dispuestas de forma horizontal, formando una gran plataforma de deposiciones carbonatadas del Mioceno (23 – 5 Ma.), con unas tonalidades blancas y amarillentas.

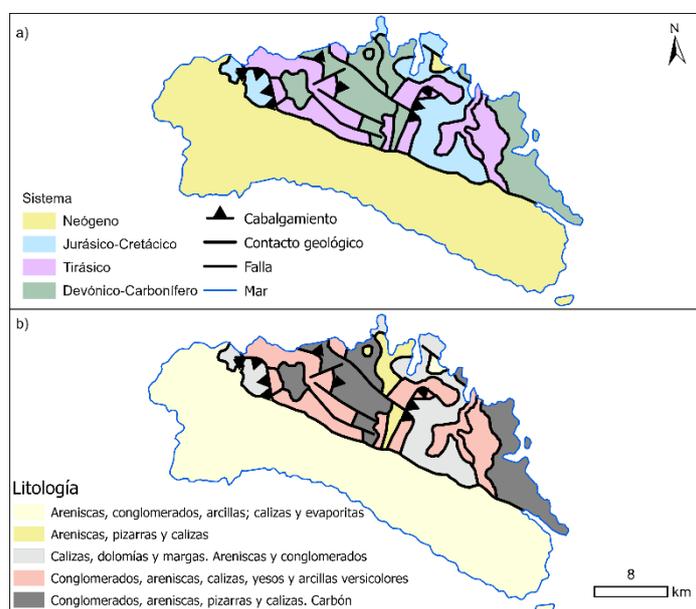


Figura 2. a) Sistemas geológicos, contactos y fallas. b) Litologías. Elaboración propia a partir de IGME (1995)

3. RESULTADOS

Como resultado de la clasificación mediante *K-Means* a partir de la organización resultante del *PCA*, se genera el mapa de la Figura 3. En esta, se diferencian las siguientes 7 agrupaciones. 1) Las cuencas medianas de la vertiente sur que siguen una forma alargada y se caracterizan por su poca pendiente, tanto en cabecera como en desembocadura. Además, están dominadas por areniscas del Neógeno, con una alta permeabilidad, lo que supone un bajo desarrollo de la red de drenaje y, por consecuencia, de la torrencialidad. Por lo que hace a las coberturas del suelo, predominan las zonas forestales, seguidas de las zonas agrícolas, y poca ocupación urbana. 2) Seguidamente, las cuencas de los extremos NO y SE muestran una pendiente muy baja a lo largo de toda la cuenca, así como una baja rugosidad, condicionado por las areniscas del Neógeno con texturas gruesas, lo que, en conjunto, da como resultado una cuenca con alta permeabilidad y una red de drenaje poco desarrollada. En relación con las coberturas del suelo, estas son las cuencas más antropizadas, en las cuales dominan los usos agrícolas y existe una alta presencia de zonas urbanas. 3) A continuación, las cuencas con su cabecera sobre zonas del Mesozoico y con desembocadura en ambas vertientes, se caracterizan por una mayor pendiente, especialmente en las zonas de cabecera donde predominan las arcillas del Triásico y las calizas del Jurásico-Cretácico, y donde la alta impermeabilidad de las arcillas ha condicionado una red de drenaje más desarrollada que en el resto de las cuencas que drenan hacia la vertiente sud. Generalmente la cobertura forestal se encuentra por encima del 50%, y alrededor del 30% corresponde a un uso agrícola. Además, en las cuencas que drenan hacia el sur, el desarrollo de la red de drenaje en la cabecera, en combinación con los materiales blandos de aguas abajo ha propiciado la incisión de barrancos. 4) De forma

similar, las cuencas centrales de la vertiente de *Tramuntana* se caracterizan por una red de drenaje altamente desarrollada debido a las mayores pendientes, especialmente en la cabecera, y a la impermeabilidad de las pizarras y calizas del Devónico-Carbonífero y, en menor medida, por las arcillas y limos del Triásico. Esta red desarrollada condiciona los valores altos de torrencialidad y alta rugosidad. Distribución similar y equilibrada entre el uso forestal y agrícola, combinado con escasas zonas artificiales. 5) Por otra parte, las pequeñas cuencas del noreste están caracterizadas por un alto pendiente y una forma circular. Los valores de torrencialidad son los más elevados de la isla debido al alto desarrollo de la red de drenaje y su pequeña área. Esto es así debido a la presencia de arcillas del Triásico, las pizarras y calizas del Devónico-Carbonífero, que presentan una alta impermeabilidad. En las coberturas del suelo destacan las tierras forestales por encima del 50%, seguidas de las zonas agrícolas, con cierta presencia de suelo artificial. 6) Seguidamente, las pequeñas cuencas sobre litologías post-Triásico se encuentran en las manchas de calizas del Jurásico-Cretáceo de la costa norte, y en las cuencas más pequeñas de la costa sur. Estas están caracterizadas por una pendiente con valores medios. La densidad de drenaje es baja, similar a la de las cuencas alargadas de la costa sur, debido a la cierta permeabilidad de las litologías calizas de la costa norte, y especialmente de las areniscas de la costa sur. Por su parte, las coberturas de suelo muestran cierta heterogeneidad entre cuencas. 7) Finalmente, se encuentra una última agrupación que incluye una única cuenca de dimensiones reducidas de norte de la isla, que presenta una gran pendiente sobre arcillas y limos del Triásico, factores que condicionan una red de drenaje altamente desarrollada, con un alto índice de torrencialidad. Estas características litogeológicas e hidrográficas se asimilan a las de las cuencas centrales de *Tramuntana*, siendo el tamaño la principal diferencia.

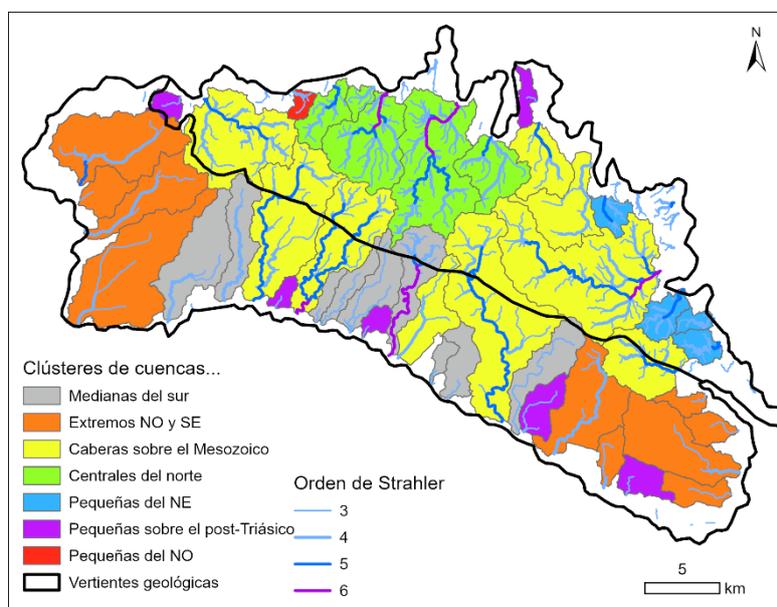


Figura 3. Resultados del análisis *K-Means* en base a las agrupaciones del *PCA*.

4. CONCLUSIONES

La clusterización de las cuencas en base a parámetros morfométricos, a las coberturas del suelo y a las litologías permite clasificar el espacio geográfico en base a estas características físicas, y a su vez en el comportamiento hidráulico potencial en estas cuencas durante episodios de precipitaciones intensas. Se ha comprobado como las características litológicas en la cabecera de la cuenca, así como aguas abajo, condicionan el desarrollo de la red de drenaje y su incisión sobre el territorio. En este sentido, las arcillas y limos de la Menorca roja son las litologías que derivan en una mayor pendiente de la cuenca y de sus tramos. Por su parte, los limos negros, arcillas y pizarras de la Menorca oscura se relacionan con un mayor desarrollo de la red de drenaje y, por ende, de torrencialidad. Esto es así debido a la alta impermeabilidad de los materiales que la conforman. De forma contraria, las areniscas del Neógeno que dominan en la vertiente de *Migjorn* se caracterizan por una mayor permeabilidad con relieves de poca pendiente y, en consecuencia, un menor desarrollo de la red de drenaje.

Este trabajo ha servido de base para el desarrollo de un conjunto de geoprosos que permitan analizar numerosas cuencas teniendo en cuenta gran cantidad de parámetros y fuentes de datos referentes a las coberturas del suelo, y a variables geológicas. En futuros trabajos se deberá mejorar la precisión espacial de

los datos de entrada y, en vista de los resultados, introducir nuevos parámetros relacionados con la red de drenaje, la topografía de la cuenca, y variables climáticas. Además, desde la perspectiva del riesgo, se deberán analizar los usos del suelo más cercanos a la red de drenaje como factor fundamental en caso de crecidas, así como en la configuración de esta.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo forma parte del proyecto “*Integral flood risk management in small Mediterranean catchments: monitoring and protocols development for building resilient territories (INFLOODMED)*”, Ayuda TED2021-129834B-I00 financiada por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por la Unión Europea NextGenerationEU/PRTR. Alexandre Moragues es beneficiario de un contrato pre-doctoral FPU22/03944 financiado por el Ministerio de Educación, Formación Profesional y Deportes.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Basu, T., & Pal, S. (2019). RS-GIS based morphometrical and geological multi-criteria approach to the landslide susceptibility mapping in Gish River Basin, West Bengal, India. *Advances in Space Research*, 63(3), 1253–1269. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2018.10.033>
- Elsadek, W. M., & Almaliki, A. H. (2024). Integrated hydrological study for flash flood assessment using morphometric analysis and MCDA based on hydrological indices—Al-Sail Al-Kabir, KSA. *Natural Hazards*, 120(7), 6853–6880. <https://doi.org/10.1007/s11069-024-06450-2>
- Estrany, J., & Grimalt, M. (2014). Catchment controls and human disturbances on the geomorphology of small Mediterranean estuarine systems. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 150(PB), 230–241. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2014.03.021>
- Gaurav Singh, V., & Singh, S. K. (2024). Analysis of geo-morphometric and topo-hydrological indices using COP-DEM: a case study of Betwa River Basin, Central India. *Geology, Ecology, and Landscapes*, 8(2), 101–128. <https://doi.org/10.1080/24749508.2022.2097376>
- Gautam, P. K. (2023). The significance of morphometric analysis of Shimsha River, Karnataka, India to understand the hydrological and morphological characteristics. *River*, 2(4), 490–505. <https://doi.org/10.1002/rvr2.66>
- Gelabert, B., Fornós, J. J., Pardo, J. E., Rosselló, V. M., & Segura, F. (2005). Structurally controlled drainage basin development in the south of Menorca (Western Mediterranean, Spain). *Geomorphology*, 65(1–2), 139–155. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.08.005>
- IGME. (1995). *Mapa Geológico de España a escala 1:1.000.000*. Mapa Geológico de La Península Ibérica, Baleares y Canarias a Escala 1:1.000.000, Edición 1995. [https://info.igme.es/cartografiadigital/geologica/Geologicos1MMapa.aspx?Id=Geologico1000_\(1994\)](https://info.igme.es/cartografiadigital/geologica/Geologicos1MMapa.aspx?Id=Geologico1000_(1994))
- Jin, Y., Liu, J., Lin, L., Wang, A., & Chen, X. (2018). Exploring hydrologically similar catchments in terms of the physical characteristics of upstream regions. *Hydrology Research*, 49(5), 1467–1483. <https://doi.org/10.2166/nh.2017.191>
- Karalis, S., Karymbalis, E., Valkanou, K., Chalkias, C., Katsafados, P., Kalogeropoulos, K., Batzakis, V., & Bofilios, A. (2014). Assessment of the Relationships among Catchments’ Morphometric Parameters and Hydrologic Indices. *International Journal of Geosciences*, 05(13), 1571–1583. <https://doi.org/10.4236/ijg.2014.513128>
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2012). *Mapa Forestal de España (MFE25)*. MFE de Máxima Actualidad - Illes Balears. https://www.miteco.gob.es/es/cartografia-y-sig/ide/descargas/biodiversidad/mfe_illesbalears.html
- Panagos, P., Van Liedekerke, M., Borrelli, P., Köninger, J., Ballabio, C., Orgiazzi, A., Lugato, E., Liakos, L., Herivas, J., Jones, A., & Montanarella, L. (2022). European Soil Data Centre 2.0: Soil data and knowledge in support of the EU policies. *European Journal of Soil Science*, 73(6). <https://doi.org/10.1111/ejss.13315>
- Raja Shekar, P., & Mathew, A. (2024). Morphometric analysis of watersheds: A comprehensive review of data sources, quality, and geospatial techniques. *Watershed Ecology and the Environment*, 6(December 2022), 13–25. <https://doi.org/10.1016/j.wsee.2023.12.001>
- Sàbat, F., Gelabert, B., & Rodríguez-Perea, A. (2018). Minorca, an exotic balearic island (Western mediterranean). *Geologica Acta*, 16(4), 411–426. <https://doi.org/10.1344/GeologicaActa2018.16.4.5>

Aplicación técnica del *Data Mining* en el estudio de la movilidad pendular en el entorno metropolitano de Sevilla

L. Quetglas Llull¹

¹ Departamento de Geografía Física y Análisis Geográfico Regional, Universidad de Sevilla. C/ D^a María de Padilla, s/n - 41004 Sevilla (Andalucía).

lquetglas@us.es, <https://orcid.org/0000-0003-4497-5208>

RESUMEN: Comprender los patrones de movilidad urbana es crucial para mejorar la calidad de vida en las ciudades. Este estudio explora la aplicación de técnicas avanzadas de minería de datos para analizar la movilidad pendular en el área metropolitana de Sevilla. Utilizando datos del Estudio de Movilidad con Big Data del Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible, identificamos los municipios con el mayor número de viajes hacia y desde Sevilla, definiendo un área metropolitana basada en los movimientos pendulares y comparándola con los límites existentes del POTA. Se utilizaron métodos como el clustering y los algoritmos de asociación para identificar patrones de viaje comunes y examinar las relaciones entre variables de movilidad como los tiempos de viaje, la densidad de tráfico y los intervalos de tiempo. El estudio revela conocimientos significativos sobre el comportamiento de los viajeros y proporciona una base para políticas de transporte más eficientes y sostenibles. Los métodos avanzados de análisis de datos ofrecen una comprensión más profunda de los patrones de movilidad urbana, facilitando una mejor gestión de los recursos y abordando de manera efectiva los desafíos actuales de movilidad urbana.

Palabras-clave: Movilidad Urbana, Clustering, Patrones Pendulares, Área Metropolitana.

1. INTRODUCCIÓN

En el mundo contemporáneo, comprender los patrones de movilidad urbana es crucial para mejorar la calidad de vida en las ciudades. La movilidad pendular, es decir, los desplazamientos diarios entre el hogar y el lugar de trabajo o estudio, impacta significativamente la dinámica urbana, la planificación territorial y la eficiencia de las infraestructuras de transporte (Cano, G *et al.*, 2011). Estos flujos afectan la congestión del tráfico, la contaminación del aire y aspectos económicos y sociales, como el acceso a oportunidades laborales y educativas. La ciudad de Sevilla, con su compleja trama urbana y su importancia como capital provincial y autonómica, es un buen caso para analizar estos flujos de movimiento (Lee, K *et al.*, 2018).

Esta comunicación explora la aplicación de técnicas avanzadas de minería de datos en el estudio de la movilidad pendular en el entorno metropolitano de Sevilla. La minería de datos permite extraer información valiosa de grandes volúmenes de datos mediante técnicas estadísticas y algoritmos avanzados. En este estudio se utiliza el Estudio de la Movilidad con Big Data del Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible del Gobierno de España como fuente principal de datos (<https://www.transportes.gob.es/ministerio/proyectos-singulares/estudio-de-movilidad-con-big-data>). El objetivo es identificar los municipios con mayor número de viajes hacia y desde Sevilla, para definir un área metropolitana basada en los movimientos pendulares y compararla con la ya existente delimitada por el POTA (Plan de Ordenación del Territorio de Andalucía).

Utilizando métodos como el *clustering* y los algoritmos de asociación, se identifican patrones de viaje comunes y se examinan las relaciones entre variables de movilidad, como tiempos de viaje, densidad de tráfico e intervalos de tiempo. El *clustering* agrupa datos en conjuntos homogéneos, permitiendo identificar grupos de viajeros con comportamientos similares (Haustein, S y Sick T.A., 2015). Los algoritmos de asociación descubren relaciones significativas entre variables, facilitando la comprensión de los factores que influyen en la movilidad (Cho, S *et al.*, 2021).

2. METODOLOGÍA

Este estudio aplica técnicas avanzadas de minería de datos para analizar la movilidad pendular en el entorno metropolitano de Sevilla. Los datos utilizados procedentes del MITMA proporcionan un conjunto de datos detallado sobre los patrones de desplazamiento diarios entre los municipios y Sevilla, permitiendo un análisis exhaustivo de los flujos de movilidad y sus características. Específicamente, para este estudio se han utilizado los datos móviles con una matriz de movilidad obligada recurrente, los cuales ofrecen, para cada mes, el número de días durante las dos semanas de estudio en los que el viajero realiza cada trayecto entre la zona de origen y la zona de destino.

El preprocesamiento de los datos se realizó utilizando el lenguaje de programación R. En primer lugar, se llevó a cabo una limpieza de datos rigurosa, eliminando registros duplicados e inconsistentes que podrían afectar la calidad y precisión del análisis. A continuación, se procedió a la normalización de las variables y al filtrado de datos donde la variable origen y destino fuera uno de los códigos de los municipios de la provincia de Sevilla y una de las variables de la matriz origen-destino fuera el código de uno de los distritos de la capital hispalense. Finalmente, se realizaron las transformaciones necesarias para ajustar los datos al formato requerido para el análisis, incluyendo la conversión de formatos de fecha y la codificación de variables categóricas.

Para el análisis de clustering jerárquico, se utilizó la fórmula de Lance-Williams para calcular las distancias entre los clústeres de municipios (Gagolewski M *et al.*, 2023). Esta fórmula es particularmente adecuada para este tipo de análisis debido a su flexibilidad y capacidad para manejar diferentes métodos de clustering jerárquico. La fórmula utilizada (figura X) donde $d(u, v)$ representa la distancia entre el nuevo clúster u y los clústeres v, s y T es una normalización basada en las cardinalidades de los clústeres. Esta fórmula permite calcular la distancia entre clústeres de manera precisa, tomando en cuenta tanto el tamaño de los clústeres como las distancias entre los elementos individuales dentro de los clústeres.

$$d(u, v) = \sqrt{\frac{|v| + |s|}{T} d(v, s)^2 + \frac{|v| + |t|}{T} d(v, t)^2 - \frac{|v|}{T} d(s, t)^2}$$

El método de clustering jerárquico aglomerativo se aplicó utilizando la matriz de distancias calculada. Este método comienza considerando cada municipio como un clústeres individual y fusiona iterativamente los clústeres más cercanos hasta que todos los municipios están agrupados en un solo clústeres (Pasupathi, S *et al.*, 2021). Este proceso permitió agrupar los municipios en clústeres homogéneos basados en sus patrones de movilidad hacia Sevilla. El dendrograma, que ilustra la estructura jerárquica de los municipios, se generó a partir de esta matriz de distancias.

Para visualizar la densidad de movimientos entre los municipios y Sevilla, se creó un mapa de calor utilizando el software QGIS. El mapa de calor se generó con un radio de 10 kilómetros para representar la intensidad de los desplazamientos (Sobral, T *et al.*, 2019). Esta elección de radio permite capturar la concentración de movimientos en un área significativa alrededor de cada municipio, reflejando de manera precisa los patrones de movilidad. Los colores cálidos (rojo y amarillo) en el mapa indican áreas con alta densidad de movimientos, mientras que los colores fríos (azul y verde) representan áreas con menor densidad. Esta visualización facilita la identificación rápida de las zonas con mayor y menor flujo de movilidad hacia la capital, proporcionando una comprensión clara de los patrones espaciales de desplazamiento.

Se comparó el área metropolitana definida a partir de los datos de movilidad con la delimitada en el Plan de Ordenación del Territorio de Andalucía (POTA). Esta comparación es crucial para evaluar si los límites administrativos actuales reflejan adecuadamente los patrones de movilidad real. Al confrontar los datos de movilidad con los límites administrativos establecidos en el POTA, se busca ajustar la planificación territorial a la realidad de los desplazamientos diarios, optimizando así la distribución de recursos y mejorando la calidad de vida de los habitantes de Sevilla y su entorno. Esta evaluación puede revelar la necesidad de añadir o eliminar municipios del área metropolitana establecida, basándose en los movimientos reales de los viajeros.

3. RESULTADOS

Los resultados se han organizado a través de dos maneras, la primera de ellos mediante un dendrograma y la segunda de ellas mediante un mapa de calor.

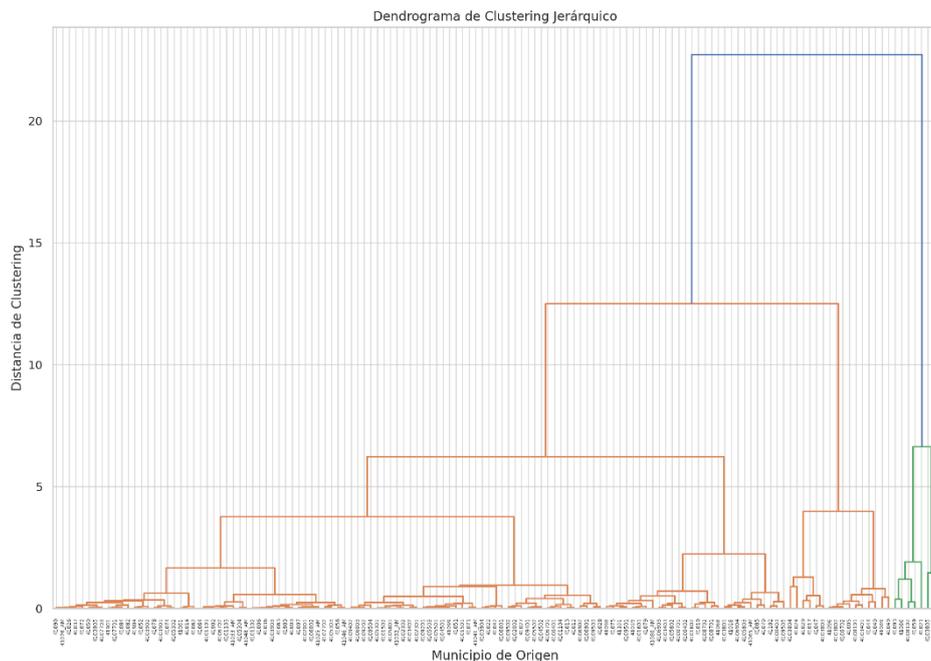


Figura 1. Dendrograma de Clustering Jerárquico

El dendrograma obtenido, presentado en la Figura 1, revela la estructura jerárquica de los municipios basada en sus patrones de movimientos hacia Sevilla. Este análisis ha permitido identificar diversos clústeres que reflejan la dinámica de desplazamiento y las características socioeconómicas de los municipios (Heredia, C *et al.*, 2021). En primer lugar, el clúster principal, representado por la rama azul, agrupa municipios con un comportamiento de movimiento similar y considerablemente distinto respecto al resto. La altura en el dendrograma indica una distancia significativa, sugiriendo que estos municipios comparten características distintivas en sus flujos de movimiento hacia Sevilla. Un ejemplo claro de esto son municipios como Dos Hermanas y Alcalá de Guadaíra, conocidos por su proximidad y conexión directa con Sevilla a través de importantes vías de transporte. Estos municipios presentan un alto volumen de desplazamientos diarios hacia Sevilla, tanto por motivos laborales como educativos, facilitados por la infraestructura de transporte, como el metro y las líneas de autobuses frecuentes, lo que contribuye a un patrón de movimiento homogéneo dentro del clúster. La alta conectividad y la robusta red de servicios de transporte público son factores críticos que explican esta agrupación.

El clúster secundario, representado por la rama naranja, está compuesto por varios subgrupos que reflejan una menor distancia entre los municipios que lo conforman en comparación con el clúster principal. Los subgrupos dentro de esta rama pueden indicar agrupaciones regionales o socioeconómicas más específicas. Por ejemplo, municipios como Mairena del Aljarafe y Tomares se agrupan dentro de este clúster. Aunque no tan cercanos como los del clúster principal, tienen una buena infraestructura de transporte que facilita los movimientos hacia Sevilla. El perfil demográfico de estos municipios también puede ser similar, con una población activa que trabaja o estudia en la capital. La presencia de áreas residenciales de alto crecimiento y parques empresariales en estas localidades refuerza la necesidad de desplazamientos regulares hacia Sevilla. Además, la estructura económica de estos municipios, con una significativa presencia de sectores como el comercio y los servicios, contribuye a la frecuencia de estos movimientos.

El clúster tercero, representado por la rama verde, agrupa municipios que, aunque muestran similitudes entre sí, presentan patrones de movimiento más variados en comparación con los clústeres anteriores. Por ejemplo, municipios más alejados como Utrera y Lebrija, aunque tienen una menor frecuencia de desplazamientos, comparten características socioeconómicas o infraestructurales. La presencia de redes de transporte menos desarrolladas y una menor dependencia de Sevilla para servicios básicos caracterizan a estos municipios. Sin embargo, eventos o actividades específicas, como ferias y festivales, pueden ocasionar picos en los desplazamientos hacia la capital. Además de los ejemplos mencionados, se pueden observar otros patrones interesantes dentro del dendrograma. Por ejemplo, municipios de la Sierra Norte y Sierra Sur,

aunque geográficamente dispersos, pueden formar sub-clústeres debido a sus características rurales y patrones de movimiento esporádicos hacia Sevilla. Estos municipios podrían estar influenciados por factores como la distancia geográfica, la falta de transporte público frecuente y la dependencia de Sevilla para servicios especializados o actividades ocasionales. En conjunto, el dendrograma proporciona una visión detallada de cómo los municipios alrededor de Sevilla se organizan en términos de sus patrones de movimiento hacia la capital, destacando las complejas interrelaciones entre infraestructura, geografía y dinámica socioeconómica.

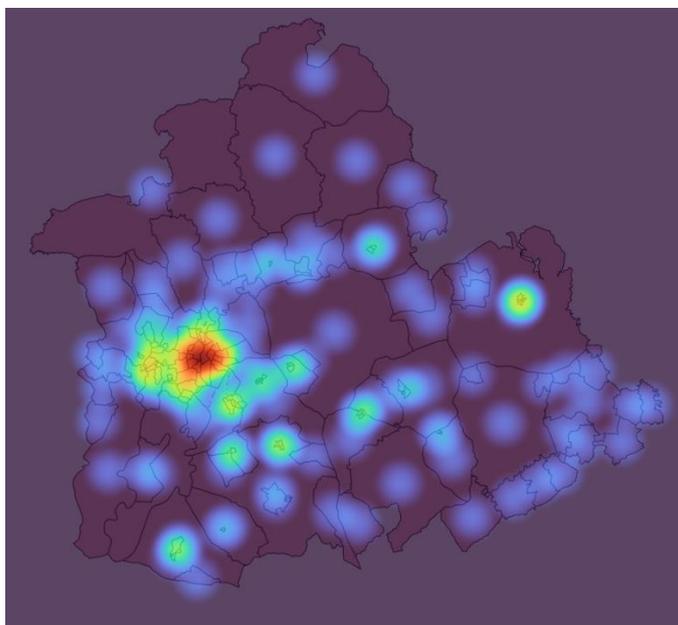


Figura 2. Mapa de calor de la provincia de Sevilla

El mapa de calor proporcionado revela la densidad de movimientos de los municipios hacia Sevilla, utilizando una escala de colores para indicar la intensidad de dichos movimientos. Los colores cálidos, como el rojo y el amarillo, representan áreas con alta densidad de desplazamientos, mientras que los colores fríos, como el azul y el verde, indican una menor densidad. Esta visualización permite identificar rápidamente las zonas con mayor y menor flujo de movilidad hacia la capital.

La región central del mapa, que aparece en tonos rojos y amarillos, destaca como el área de mayor concentración de movimientos hacia Sevilla. Esto sugiere que los municipios ubicados en esta zona, como Dos Hermanas y Alcalá de Guadaíra, tienen una conexión intensa con Sevilla. La alta densidad de desplazamientos en estos municipios puede atribuirse a su proximidad geográfica y a la existencia de una infraestructura de transporte bien desarrollada, que incluye líneas de autobuses frecuentes y el metro. Estos factores facilitan los movimientos diarios de personas que se desplazan por motivos laborales, educativos y otros servicios esenciales.

Por otro lado, las áreas representadas en colores azules y verdes, situadas en la periferia del mapa, muestran una menor densidad de movimientos hacia Sevilla. Esto es indicativo de municipios más alejados, como Utrera y Lebrija, donde los desplazamientos son menos frecuentes debido a una infraestructura de transporte menos desarrollada y una menor dependencia de Sevilla para servicios básicos. Sin embargo, es importante señalar que estos municipios pueden experimentar aumentos temporales en la movilidad durante eventos específicos, como ferias y festivales locales.

Además de estas tendencias generales, el mapa de calor también revela otros patrones interesantes. Por ejemplo, los municipios situados en la Sierra Norte y Sierra Sur, aunque dispersos geográficamente, muestran áreas con densidad moderada. Estos sub-clústeres rurales tienen patrones de movimiento menos constantes, influenciados por la distancia geográfica y la disponibilidad limitada de transporte público. La dependencia de Sevilla para servicios especializados, como atención médica avanzada o actividades culturales, también juega un papel significativo en la movilidad de estas regiones.

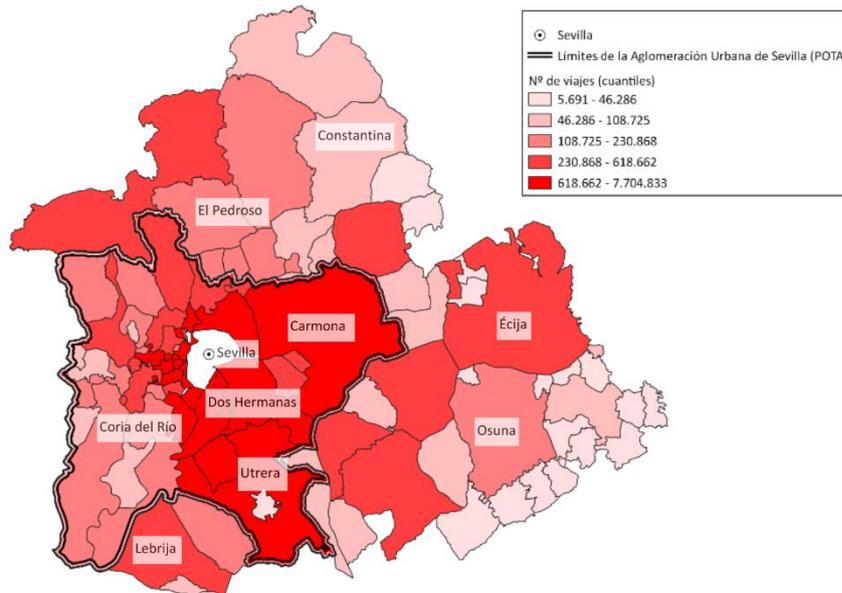


Figura 3. Volumen de desplazamientos de los municipios de la provincia de Sevilla hacia el municipio de Sevilla.

El mapa presentado muestra la distribución del número de viajes en los diferentes municipios que conforman el área metropolitana de Sevilla, delimitada por el Plan de Ordenación del Territorio de Andalucía (POTA). Los municipios que rodean directamente a Sevilla, también dentro del área delimitada por el POTA, presentan un número significativo de viajes. Esto sugiere una alta interconectividad y dependencia de estos municipios con la ciudad central. A medida que nos alejamos del núcleo central y nos movemos hacia los bordes del área metropolitana, el número de viajes disminuye, reflejado en los colores más claros. Los municipios más alejados del centro de Sevilla, incluso aquellos dentro del área POTA, registran menos viajes.

Sin embargo, también es notable que algunos municipios que se encuentran fuera del área metropolitana delimitada por el POTA muestran valores altos en el número de viajes. Estos municipios, a pesar de estar fuera del límite definido, tienen una actividad de movilidad considerable. El análisis del mapa sugiere una fuerte relación entre la ubicación de los municipios dentro del área metropolitana de Sevilla y el volumen de viajes, pero también destaca la importancia de algunos municipios periféricos que, pese a no estar dentro del límite del POTA, tienen una considerable actividad de movilidad. Este patrón subraya la necesidad de una planificación territorial y de transporte que considere no solo el núcleo urbano y su área metropolitana inmediata, sino también los municipios periféricos que juegan un rol crucial en la conectividad y en la dinámica regional.

4. CONCLUSIONES

En el estudio se ha demostrado la eficacia de las técnicas avanzadas de minería de datos para analizar la movilidad pendular en el entorno metropolitano de Sevilla, ofreciendo una visión más precisa y detallada en comparación con los métodos tradicionales (Dash, M *et al.*, 2015). A través del uso de técnicas de clustering jerárquico, se identificaron varios grupos de municipios con patrones de desplazamiento similares hacia Sevilla. Estos clústeres reflejan tanto la proximidad geográfica como la infraestructura de transporte y las características socioeconómicas de los municipios. Por ejemplo, municipios como Dos Hermanas y Alcalá de Guadaíra se destacan por su alta conectividad y volumen de desplazamientos hacia la capital, facilitados por una robusta red de transporte público.

El mapa de calor creado con QGIS permitió visualizar la densidad de desplazamientos de manera efectiva, mostrando áreas con alta y baja densidad de movimientos. Los municipios más cercanos a Sevilla, especialmente en la región central, presentan una alta densidad de desplazamientos, mientras que los municipios periféricos, aunque menos frecuentes en sus desplazamientos, tienen picos de movilidad en eventos específicos. La comparación entre el área metropolitana definida por los datos de movilidad y la delimitada por el Plan de Ordenación del Territorio de Andalucía (POTA) reveló discrepancias significativas. Algunos municipios fuera del área delimitada por el POTA mostraron una considerable actividad de movilidad, lo que sugiere la necesidad de reconsiderar los límites administrativos para reflejar mejor los patrones de movilidad real.

(Long, Y et al., 2015). Los factores cruciales que influyen en los patrones de movilidad son la infraestructura de transporte y las características socioeconómicas. Los municipios con una infraestructura de transporte bien desarrollada y una economía activa en sectores como comercio y servicios presentan una mayor frecuencia de desplazamientos hacia Sevilla.

Los resultados del estudio proporcionan una base sólida para el desarrollo de políticas de transporte más eficientes y sostenibles. La integración de técnicas avanzadas de análisis de datos en la planificación urbana puede mejorar la gestión de los recursos y abordar de manera más efectiva los desafíos actuales de movilidad urbana. En resumen, este estudio subraya la importancia de utilizar enfoques basados en datos para comprender y mejorar la movilidad urbana, facilitando una planificación territorial más precisa y adaptable a las necesidades reales de los ciudadanos.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Cano, G., Ruiz y Ventura, J. (2011): "Movilidad cotidiana por motivos laborales en Andalucía". En I.Pujadas, J.Bayona, A.García, F.Gil, C.López, D.Sánchez y T.Vidal (Eds.), *Población y espacios urbanos* (pp. 77-94). Departamento de Geografía Humana de la UB y Grupo de población de la AGE. http://www.ub.edu/congreso_poblacion/docs/actas.pdf
- Cho, S y Kim, J. (2021). Clustered embedding using deep learning to analyze urban mobility on complex transportation data. *PLOS ONE* 16(4):e0249318. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0249318>
- Dash, M., Koo, K.K., Holleczeck, T., Yap, G., Krishnaswamy, S.P. y Shi-Nash, A. (2015). From Mobile Phone Data to Transport Network – Gaining Insight about Human Mobility. *IEEE International Conference on Mobile Data Management*. 243-250. <https://doi.org/10.1109/MDM.2015.74>
- Gagolewski, M., Cena, A., James, S. y Beliakov, G. (2023). Hierarchical clustering with OWA-based linkages, the Lance–Williams formula, and dendrogram inversions. *Fuzzy Sets and Systems*, 473. <https://doi.org/10.1016/j.fss.2023.108740>
- Haustein, S y Sick T.A. (2015). European mobility cultures: A survey-based cluster analysis across 28 European countries. *Journal of Transport Geography*, 54, 173-180. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2016.05.014>
- Heredia, C., Moreno, S. y Yushimito, W.F. (2021). Characterization of Mobility Patterns With a Hierarchical Clustering of Origin-Destination GPS Taxi Data. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23:8. <https://doi.org/10.1109/TITS.2021.3116963>
- Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía. Datos Espaciales de Referencia de Andalucía (DERA). Recuperado el 2 de septiembre de 2024 en: <https://www.juntadeandalucia.es/institutodeestadisticaycartografia/dega/datos-espaciales-de-referencia-de-andalucia-dera>
- Lee, K., Young You, S., Ki Eom, J., Song, J. y Hong Min, J. (2018). Urban spatiotemporal analysis using mobile phone data: Case Study of medium- and large- sized Korean cities. *Habitat International*, 73, 6-15. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2017.12.010>
- Long, Y., Han, H., Tu, Y. y Shu, X. (2015). Evaluating the effectiveness of urban growth boundaries using human mobility and activity records. *Cities*, 46, 76-84. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2015.05.001>
- Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible. Estudio de la movilidad con Big Data. Recuperado el 2 de septiembre de 2024 en: <https://www.transportes.gob.es/ministerio/proyectos-singulares/estudio-de-movilidad-con-big-data>
- Pasupathi, S., Shanmuganathan, V., Madasamy, K., Robinson, H y Kim, M. (2021). Trend analysis using agglomerative hierarchical clustering approach for time series big data. *The Journal of Supercomputing*, 77, 6505–6524. <https://doi.org/10.1007/s11227-020-03580-9>
- Sobral, T., Galvão, T. y Borges, J. (2019). Visualization of Urban Mobility Data from Intelligent Transportation Systems. *Sensors* 19, 2:232. <https://doi.org/10.3390/s19020332>

Co-diseño de servicios climáticos mediante la integración de los modelos predictivos científicos, las geotecnologías y el conocimiento local

L. Pesquer¹, A. Batlle¹, N. Ropero², N. Hernández-Mora², E. Prat¹, A. Broekman³, M.P. González-Dugo⁴, M. Ninyerola⁵, L. De Stefano²

¹ GRUMETS Research Group. CREAM, Edifici C, Universitat Autònoma de Barcelona, 08193 Bellaterra (Catalunya).

² Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid, José Antonio Novais, 12 28040 Madrid (Madrid).

³ CREAM, Edifici C, Universitat Autònoma de Barcelona, 08193 Bellaterra (Catalunya).

⁴ IFAPA Centro Alameda del Obispo Avd. Menéndez Pidal s/n 14071 Córdoba (Andalucía).

⁵ GRUMETS Research Group. Departamento de Biología Animal, de Biología Vegetal y de Ecología, Universitat Autònoma de Barcelona, 08193 Bellaterra (Catalunya).

l.pesquer@creaf.uab.cat, <https://orcid.org/0000-0002-7396-2468>

a.batlle@creaf.uab.cat, <https://orcid.org/0000-0003-0275-8299>

nikorope@ucm.es, <https://orcid.org/0009-0008-1815-0652>

nurher03@ucm.es, <https://orcid.org/0000-0003-2487-0273>

e.prat@creaf.uab.cat, <https://orcid.org/0000-0001-9475-4070>

a.broekman@creaf.uab.cat, <https://orcid.org/0000-0002-8961-0467>

mariap.gonzalez.d@juntadeandalucia.es, <https://orcid.org/0000-0003-0423-8246>

miquel.ninyerola@uab.cat, <https://orcid.org/0000-0002-1101-0453>

luciads@geo.ucm.es, <https://orcid.org/0000-0002-9612-7051>

RESUMEN: El objetivo de este trabajo es describir el marco y el proceso de colaboración interdisciplinar en el ámbito del desarrollo de servicios climáticos (SC) entre los científicos que elaboran los modelos, los proveedores de datos, los desarrolladores de geoservicios y los usuarios de estos servicios. Este marco de colaboración es fruto del establecimiento y despliegue de actividades de co-creación en el Laboratorio Vivo Andalucía-Guadalquivir-Los Pedroches como uno de los centros de las actividades del proyecto europeo *I-CISK*. Se detallan las características del proceso de co-creación, los cinco prototipos de SC en desarrollo y las metodologías elaboradas a medida, principalmente geoestadísticas, para la mejora de la resolución espacial de los modelos climáticos. La principal conclusión es el aprendizaje mutuo entre todos los actores implicados, donde el conocimiento local es clave para que los científicos puedan focalizar sus investigaciones metodológicas en aquellos procesos más útiles para la toma de decisiones. Para los usuarios, gracias a su colaboración en todo el proceso de generación de SC, percibimos una mejora de la comprensión de los resultados de la modelización y un mayor interés en las herramientas implementadas en los SC.

Palabras-clave: servicios climáticos, laboratorio vivo, técnicas geoestadísticas en modelos climáticos, mapa de actores

1. INTRODUCCIÓN

Los servicios climáticos (SC) desempeñan un papel relevante en la provisión de herramientas para el establecimiento de sociedades resilientes al cambio global y a su compleja variabilidad a múltiples escalas, temporales y espaciales. Los avances en el desarrollo, suministro y uso de SC han ayudado a estudiar y gestionar la variabilidad climática, pero en su diseño e implementación no siempre se han tenido en cuenta los requerimientos de la comunidad de usuarios. Según el *Intergovernmental Panel on Climate Change* IPCC

2022, los SC implican el suministro de información climática de forma que ayuden a la toma de decisiones. Para ello deben incluir la contribución de usuarios y proveedores, basarse en información y experiencia científicamente consolidada y dotar de mecanismos de acceso eficaz a la información climática que responda a las necesidades de los usuarios.

El marco de la cogeneración supone un cambio conceptual desde un enfoque orientado a los resultados a un enfoque orientado al usuario en el diseño, el desarrollo y la evaluación de productos y servicios (Cantone et al., 2023). La cogeneración implica la participación conjunta de todos los actores implicados. La solución de cogeneración adoptada en el presente trabajo está basada en el establecimiento y desarrollo de un Laboratorio Vivo (LV) en las zonas de estudio. Los LV han sido descritos como plataformas de la vida real para la innovación colaborativa (Fuglsang y Hansen 2022); su misión es proporcionar ideas, experiencias y conocimientos de las personas, así como identificar sus necesidades de provisión de productos, servicios o aplicaciones, a diferencia de muchos procesos de innovación que se originan en un entorno de investigación, y donde sólo en la fase final se consideran (parcialmente) los intereses de los usuarios finales.

La mejora en la descripción de la variabilidad espacial de los modelos climáticos era y sigue siendo uno de los principales retos que los SC deben afrontar. Existe unanimidad entre los responsables en la toma de decisiones y la comunidad científica en cuanto a que “la baja resolución espacial de los modelos globales de clima no permite una discriminación espacial de las proyecciones de cambio climático en el territorio de España” (Castro et al., 2005). Los pronósticos y proyecciones de Copernicus Climate Change Service (C3S) (Berg et al., 2021) generan mapas predictivos entre 50 km, 25 km, 12.5 km y 5 km de resolución espacial (según modelo y producto), otras iniciativas entre 18.5 km, 5 km y 1 km como WorldClim (Fick y Hijmans 2017) y CHELSA (Karger et al., 2020); pero esta resolución no está apoyada en una densidad espacial de estaciones meteorológicas suficiente. Únicamente la inyección de datos locales permite incrementar la calidad de la representación espacial de la variabilidad climática a escalas locales, que son las escalas útiles para la mayoría de los usuarios de los SC. Ésta es la principal contribución del presente trabajo a la modelización de los mapas que forman parte de los productos del SC.

Finalmente, debemos indicar que el LV de este estudio se desarrolla en el marco del proyecto europeo *I-CISK* (<https://icisk.eu/>). La misión de *I-CISK* es desarrollar una nueva generación de servicios climáticos co-creados con los usuarios con el fin de satisfacer las necesidades de información climática que la comunidad científica provee a la ciudadanía, los responsables de la toma de decisiones y a todos sus usuarios, en una escala espacial y temporal acorde con sus requerimientos. En el caso de la Comarca de los Pedroches, este enfoque quiere aplicarse al propósito de generar una disminución de la vulnerabilidad de los sectores agrícola y forestal a las sequías. El principal objetivo de este trabajo es explicar los puntos clave de la implementación de la metodología de co-creación en un LV concreto, y las principales lecciones aprendidas durante su proceso.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Material

2.1.1. Área de estudio

Desde el punto de vista de la modelización climática, el área de estudio es la Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir junto a una pequeña área que corresponde a la Demarcación Hidrográfica del Guadiana que pertenece a la comarca de los Pedroches. Por otro lado, las actividades de co-diseño se centran muy especialmente en la Comarca de los Pedroches, procedencia de la gran mayoría de actores, y en una segunda región: la Sierra de Cazorla en el Alto Guadalquivir (Figura 1).

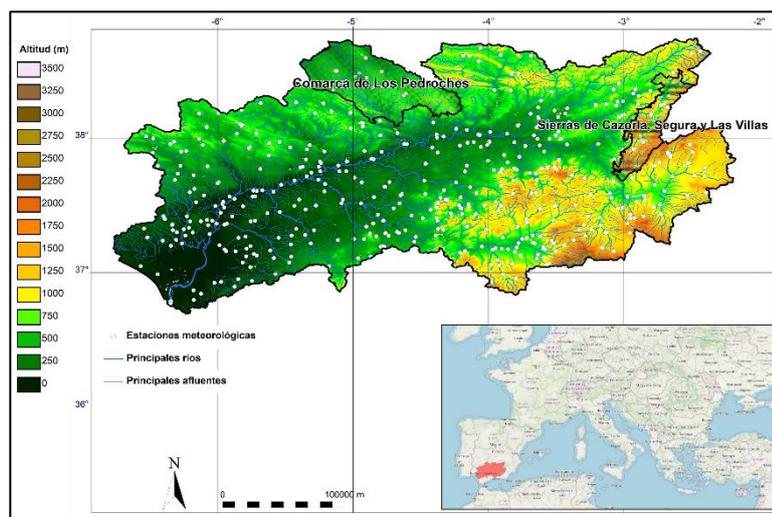


Figura 29. Área de estudio (modelo digital de elevaciones). Los puntos blancos corresponden a las estaciones de precipitación de AEMET y los polígonos tramados a las dos áreas preferentes del co-diseño. Elaboración propia

2.1.2. Datos locales

La incorporación del conocimiento y los datos locales es un valor añadido de los SC implementados. Esta información proviene de dos fuentes principales:

- Series temporales de registros históricos: 1081 estaciones meteorológicas de precipitación de AEMET (<https://www.aemet.es/>) y 446 de temperatura en el periodo 1975-2022. En general son datos agregados mensuales, pero son necesarios datos diarios para uno de los métodos (*bias-adjustment*, detalles en la sección *Modelos espaciales y modelos predictivos*).
- Ráster continuos a la resolución espacial demandada (250m, 500m) de factores climáticos que formaran parte de la metodología de regresión lineal multivariante y el *downscaling* (detalles en la sección *Modelos espaciales y modelos predictivos*): modelo digital de elevaciones (<https://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp>), modelo digital de orientaciones (linealizado, no circular), distancia cuadrática a la costa atlántica, distancia cuadrática a la costa mediterránea y radiación solar potencial (efectos de la densidad óptica atmosférica constantes) acumulada, mapas de elaboración propia obtenidos a partir de procedimientos SIG (sección 2.2.2).

2.2. Metodología

2.2.1. Co-creación

En el presente estudio, la co-creación de los SC está fundamentada en la constitución y desarrollo de todas las actividades en el ámbito del Laboratorio Vivo, un espacio de colaboración entre actores de la región de estudio y el equipo científico promotor del proyecto. Los participantes representan diferentes grupos de interés del sector agrícola y forestal, integrados en una Plataforma Multi-Actor (PMA) <https://icisk.eu/living-labs/living-lab-details-es/>, además de involucrar un grupo más amplio de actores en las actividades de manera más puntual.

La metodología desarrollada consta de cinco fases interrelacionadas (Figura 2) todas ellas en el LV; sus actores son el centro de todos los procesos (Kalsnes et al., 2023). Estas fases son:

- Co-exploración de las necesidades y requerimientos de los usuarios.
- Co-identificación de las medidas de adaptación y estrategias de disminución del riesgo que deben ser informadas por los SC desarrollados.
- Co-desarrollo de la información climática incorporando experiencia, datos y conocimiento local de manera que los SC generados hayan recolectado las particularidades (geográficas, culturales, etc.) locales y regionales.

- Co-diseño de los SC para que la información climática llegue a los usuarios de forma comprensible, transparente, en formatos abiertos, accesibles y útiles para la toma de decisiones.
- Co-evaluación de los SC con el fin de que sean precisos, creíbles, informen de sus incertidumbres y por lo tanto merezcan la confianza de los usuarios.



Figura 30. Marco de co-creación de los servicios climáticos. Elaboración propia

Y una última fase, tras la implementación de los SC pre-operacionales:

- Co-diseminación de los SC con el fin de potenciar su uso más allá del núcleo de usuarios de la PMA y de esta forma buscar su sostenibilidad a largo plazo.

2.2.2. Modelos espaciales y modelos predictivos

Desde el punto de vista temporal, se han desarrollado tres tipos de servicios climáticos: registros históricos y dos modelos predictivos a futuro, pronósticos estacionales y proyecciones climáticas. Las variables elegidas (acordadas en el marco del proceso de co-creación del LV) fueron temperatura media mensual y precipitación agregada mensual. A partir de ellas y sus anomalías se generan índices de sequía (SPI and SPEI) (Vicente-Serrano et al, 2010).

- Generación de mapas continuos a partir de registros históricos:

Partiendo de los datos locales sobre series temporales de registros históricos mencionados anteriormente, el método aplicado para la generación de mapas históricos continuos es la regresión lineal multivariante (RLM) + interpolación de residuos (IR) (Ninyerola et al., 2007), usando las herramientas específicamente desarrolladas (Pesquer et al., 2007) en el SIG MiraMon (<https://miramon.cat/>). Las variables independientes introducidas en el modelo son las descritas como rásters continuos en la sección *Datos locales*.

- Generación de mapas continuos de predicciones estacionales

A partir de los datos correspondientes al subperiodo de referencia de 1993-2007 de la misma red de estaciones AEMET descrita en la sección *Datos locales*, se ejecuta el modelo ECMWF-Seas5 (Johnson et al., 2019) + *Bias adjustment* (Berg et al., 2022) con el que se obtienen los pronósticos estacionales de temperatura y precipitación de los próximos 6 meses en las localizaciones de las estaciones. Mediante el postproceso RLM+ IR descrito en el punto anterior, se generan mapas continuos a 250m.

- Generación de mapas continuos de proyecciones climáticas

A partir de las proyecciones mensuales accesibles en <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/sis-hydrology-meteorology-derived-projections?tab=form> (C3S) se agrupan los distintos miembros de una modelización para generar una predicción promedio de los distintos miembros (*ensemble*) y unos cuartiles de incertidumbre. Posteriormente se aplica un *downscaling* geoestadístico. En la primera versión desarrollada el método utilizado es *cokriging* (Ishida et al., 1993), con la variable independiente más significativa

de la RLM, a 500 m de resolución espacial y para el período 2026-2060.

2.2.3. Geotecnologías

Los SC implementados en la web están contruidos en base a *Shiny apps* (<https://shiny.posit.co/>). Esta tecnología proporciona un marco para crear aplicaciones web interactivas usando instrucciones Python y R. Mayoritariamente se ha optado por R, apoyado por una comunidad que continuamente va desarrollando nuevas funcionalidades (Li 2020). Las versiones estables de los códigos desarrollados sobre esta plataforma serán compartidas en GitHub.

3. RESULTADOS

Los dos resultados principales del proyecto son el establecimiento y consolidación del Laboratorio Vivo y el paquete de servicios climáticos desarrollados.

El LV integra 17 actores (algunas entidades con 2 o 3 miembros) pertenecientes a instituciones públicas y privadas de los sectores: olivar, ganadero, forestal y de desarrollo rural. Durante los primeros 30 meses del LV (con una duración total prevista de 48 meses en el marco del proyecto I-CISK), se han realizado reuniones mayoritariamente virtuales (también alguna presencial) bilaterales y sectoriales, dos talleres plenarios presenciales, grupos focales presenciales y se han enviado tres encuestas específicas para identificar necesidades, recolectar opiniones sobre la implementación de los servicios y sobre las medidas de adaptación al cambio global. Se ha invertido un esfuerzo adicional en generar una estrategia de comunicación adecuada a las dinámicas del LV, reforzando el objetivo del proyecto de incrementar el uso de SC.

Los cinco servicios climáticos implementados son accesibles en la plataforma climática del proyecto: <https://i-cisk.dev.52north.org/living-labs/guadalquivir-es/>.

Estos servicios son:

- Predicciones estacionales
- Proyecciones climáticas
- Registros históricos
- Servicio agroclimático
- Caracterización hidrológica

Los cinco SC son producto del co-diseño, del desarrollo de metodologías adaptadas a las necesidades de los usuarios y del uso de geotecnologías (protocolos automáticos + interfaces interactivas) en su implementación en la web. Los tres primeros SC corresponden a los métodos geoestadísticos explicados en la sección Modelos espaciales y modelos predictivos, la descripción de las metodologías específicas de los dos últimos SC excede del objetivo de este trabajo. Se han validado los resultados de los modelos espaciales a partir de puntos de test independientes (25% de la muestra) y se han obtenido unos RMSE (raíz del error cuadrático medio) variables según mes y año RMSE [0.6,1.3] °C para temperatura y RMSE [0.4, 69.8] mm para precipitación.

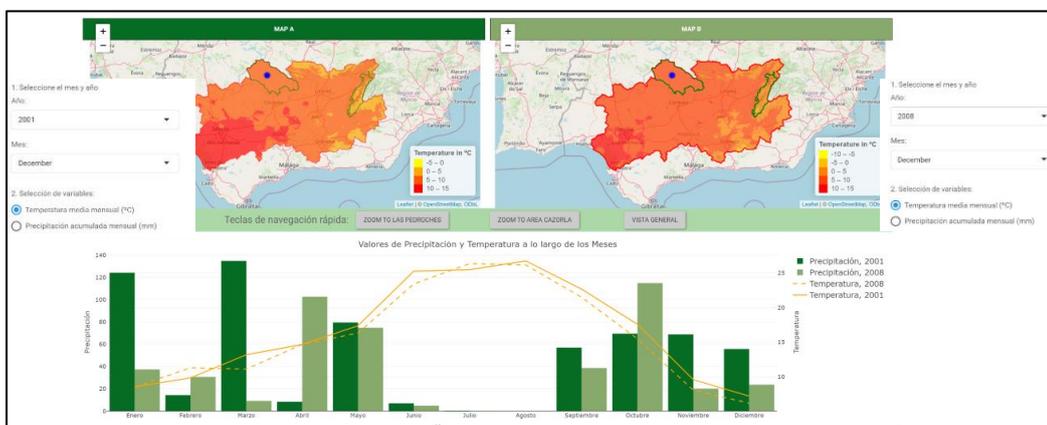


Figura 31. Ejemplo de la interfaz del servicio climático de registros históricos. Elaboración propia

La interfaz gráfica de los SC incluye mapas comparativos entre distintas fechas o en distintas localizaciones (píxeles de los modelos continuos o datos históricos o predicciones en las estaciones meteorológicas), gráficos estadísticos univariantes o bivariantes, zooms generales y específicos a las dos zonas de estudio preferentes, utilidades de descarga y de copia de gráficos, etc. (Figura 3).

4. DISCUSIÓN

La cogeneración de SC en el marco del LV permite la incorporación del conocimiento y la experiencia de los usuarios desde el primer momento y durante todo el progreso hasta su desarrollo completo. El proceso de co-creación implica una mayor inversión de tiempo respecto a enfoques que no involucran los usuarios, sin embargo, tiene más posibilidades de que el resultado sea útil para la toma de decisiones de los usuarios. Los SC desarrollados están totalmente enfocados a sus necesidades y por esto permite que los usuarios entiendan plenamente y se reconozcan en la herramienta, mejorando el interés y la usabilidad de la información generada respecto a SC más generalistas o bases de datos muy amplias. De hecho, una parte importante del trabajo ha sido el de seleccionar elementos prioritarios para cada sector y agrupar elementos comunes, evitando así una dispersión de la información proporcionada en el SC. Además, el enfoque adoptado ha demostrado un gran valor en términos de transmisión de conocimientos y en la incorporación de información y experiencia local en el desarrollo y mejora de los SC. El constante diálogo en sus distintas formas (reuniones conjuntas y bilaterales, en persona y virtuales, talleres especializados, encuestas) con los actores del LV es enriquecedor para todas las partes implicadas: científicos, desarrolladores de las geotecnologías, proveedores de datos y usuarios finales.

El esfuerzo principal en la modelización se ha dirigido a la mejora de la resolución espacial mediante técnicas geostatísticas. Es fundamental integrar las características topoclimáticas regionales y el conocimiento local en los modelos predictivos globales y paneuropeos con el fin de generar SC más descriptivos de la zona de interés (Brasseur y Gallardo, 2016), permitiendo dar respuestas mejor adaptadas (bien valoradas en las encuestas a los usuarios) a las problemáticas locales, incrementando las posibilidades de adaptación y la resiliencia de la población local frente al cambio climático.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo está financiado por el programa Horizon 2020 de la Unión Europea en el marco del proyecto *I-CISK* GA 101037293. También cuenta con el soporte de la Generalitat de Catalunya a través de la ayuda SGR2021 00554. Agradecemos a AEMET la provisión de las series temporales de registros meteorológicos y a todos los actores que participan en el Laboratorio Vivo con sus aportaciones.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Brasseur, G.P., Gallardo, L. (2016) Climate services: lessons learned and future prospects. *Earth's Future*, 4 (3) 79-89, <https://doi.org/10.1002/2015EF000338>
- Berg, P., Photiadou, C., Simonsson, L., Sjokvist, E., Thuresson, J., Mook, R., (2021): Temperature and precipitation climate impact indicators from 1970 to 2100 derived from European climate projections. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). <https://doi.org/10.24381/cds.9eed87d5>
- Berg, P., Bosshard, T., Yang, W., Zimmermann, K. (2022). MIDAS—Multi-scale bias Adjustment, *Geoscientific Model Development* (15) 6165–6180. <https://doi.org/10.5194/gmd-15-6165-2022>
- Cantone, C., Grape, H.I., El Habash, S., Pechlivanidis, I., (2023) A co-generation success story: Improving drinking water management through hydro-climate services, *Climate Services*, Vol. 31 <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2023.100399>
- Castro, M. Martín-Vide J., Oroza, S.A. *El clima de España: pasado, presente y escenarios de clima para el siglo XXI*. Ministerio de Medio Ambiente (España)
- Fick, S.E., Hijmans, R.J. (2017) Worldclim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>
- Fuglsang, L., Hansen, A.V., (2022) Framing improvements of public innovation in a living lab context: Processual learning, restrained space and democratic engagement, *Research Policy*, Vol. 51(1) <https://doi.org/10.1016/j.respol.2021.104390>

- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *Climate Change 2022 (2023) Impacts, Adaptation and Vulnerability: Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Ishida, T., Kawashima, S. Use of cokriging to estimate surface air temperature from elevation. *Theoretical and Applied Climatology* 47, 147–157 (1993). <https://doi.org/10.1007/BF00867447>
- Johnson, S. J., Stockdale, T. N., ...; Monge-Sanz, B. M (2019) SEAS5: the new ECMWF seasonal forecast system, *Geoscientific Model Development* (12) 1087–1117, <https://doi.org/10.5194/gmd-12-1087-2019>.
- Kalsnes, B., Oen, A., Frauenfelder R., Heggelund, I. ... Raaphorst, K. (2023) Stakeholder evaluation of the co-production process of climate services. Experiences from two case studies in Larvik (Norway) and Flensburg (Germany). *Climate Services* 32 100409 <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2023.100409>
- Karger, D.N., Schmatz, D., Dettling, D., Zimmermann, N.E. (2020): High resolution monthly precipitation and temperature timeseries for the period 2006-2100. *Scientific Data*. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-00587-y>
- Li, Y. (2020) Towards fast prototyping of cloud-based environmental decision support systems for environmental scientists using R Shiny and Docker, *Environmental Modelling & Software*, Volume 132, <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104797> .
- Ninyerola, M., Pons, X., & Roure, J. M. (2007). Monthly precipitation mapping of the Iberian Peninsula using spatial interpolation tools implemented in a Geographic Information System. *Theoretical and Applied Climatology*, 89(3–4), 195–209. <https://doi.org/10.1007/s00704-006-0264-2>
- Pesquer, L., Masó, J., Pons, X. (2007). Integración SIG de regresión multivariante, interpolación de residuos y validación para la generación de rásters continuos de variables meteorológicas. *Revista de Teledetección*, 28, 69–76. ISSN: 1133-0953.
- Vicente-Serrano, S.M., Beguería, S., López-Moreno, J.I. (2010) A Multi-scalar drought index sensitivo to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index SPEI. *Journal of Climate* 23:1696-1718 <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>

Construyendo mapas geopolíticos de la energía: Un enfoque metodológico

Darío Salinas Palacios¹, David Ansellem²,

¹ CEO de Cassini Spain e investigador del Instituto Francés de Geopolítica 2, rue de la Liberté, 93526 Saint-Denis Cedex

² Doctor en geopolítica y CEO de Cassini France, 18 rue Marguerite long 75017 Paris (France)

dario@cassini.group, <https://orcid.org/0000-0003-2064-2476>

Amsellem.david1@gmail.com

RESUMEN: La geopolítica de la energía está intrínsecamente ligada al espacio geográfico, crucial para la localización de recursos naturales y el diseño de infraestructuras críticas. Este artículo examina cómo las Tecnologías de Información Geográfica (TIG) pueden transformar nuestra comprensión de los desafíos energéticos globales, trascendiendo la cartografía tradicional para revelar las dinámicas de poder subyacentes. Adoptamos un enfoque metodológico reflexivo para la construcción de mapas geopolíticos energéticos, destacando la importancia de las decisiones cartográficas en la representación de datos complejos. A través de estudios de caso recientes, demostramos cómo la integración estratégica de TIG permite una visualización más clara de los patrones geoespaciales y una interpretación más profunda de las estrategias geopolíticas en juego. Nuestros resultados subrayan la eficacia de combinar análisis geoespacial con interpretación geopolítica para revelar tensiones y relaciones de poder entre actores diversos. Este enfoque no solo enriquece la comprensión académica de las dinámicas energéticas globales, sino que también proporciona una base sólida para la toma de decisiones estratégicas en el sector energético.

Palabras-clave: Cartografía geopolítica_1^a, Geopolítica energética_2^a, sistemas de Información Geográfica_3^a, Análisis de recursos estratégicos_4^a.

1. INTRODUCCIÓN

En la última década, el uso de mapas para apoyar estudios geopolíticos ha ganado un interés creciente, particularmente en el sector energético. Este fenómeno se explica en gran parte por el desarrollo de nuevas herramientas cartográficas y la demanda del público por formatos más comprensibles. El creciente interés por la geopolítica ha llevado a una aplicación más amplia de sus métodos de análisis, aunque con resultados variables. Trabajos como los de Lacoste (2012) y Loyer (2022) han ayudado a refinar estos enfoques, sentando las bases para su uso efectivo en diversos campos, incluyendo el sector energético. El sector energético se presta especialmente bien a la cartografía, ya que considera factores geográficos como la ubicación de yacimientos y la infraestructura en territorios específicos. Los mapas son esenciales para comprender las dinámicas energéticas, permitiendo integrar múltiples capas de información georreferenciada y facilitando así el análisis geopolítico de los impactos y tensiones entre actores por la explotación de recursos naturales.

Este trabajo se fundamenta en la experiencia acumulada en Cassini, una empresa de consultoría e investigación especializada en análisis de riesgos geopolíticos y cartografía, vinculada al Instituto Francés de Geopolítica (Universidad de París 8) y al parque científico de la Universidad Carlos III de Madrid. Desde 2019, el equipo de Cassini elabora mapas geopolíticos para un observatorio del Ministerio de Defensa francés, centrado en la seguridad de los flujos y materiales energéticos. Producimos mapas trimestrales que abarcan desde energías fósiles hasta áreas estratégicas menos exploradas, como minerales esenciales para la energía nuclear, el hidrógeno y el almacenamiento de electricidad en baterías, que requieren minerales raros como cobalto, cobre, manganeso o litio. También examinamos el sector agrícola, crucial para entender los desafíos de la producción de biocombustibles a partir de cultivos como maíz, remolacha o caña de azúcar, prácticas que pueden generar tensiones alimentarias.

El objetivo principal de este estudio es desarrollar y presentar un enfoque metodológico reflexivo para la construcción de mapas geopolíticos utilizando Sistemas de Información Geográfica (SIG). Se busca demostrar cómo la integración estratégica de SIG puede transformar nuestra comprensión de los desafíos energéticos

actuales, proporcionando una visualización más clara de los patrones geoespaciales y una interpretación más profunda de las estrategias geopolíticas en acción. A continuación, ejemplificaremos el proceso metodológico mediante la selección de una serie de casos de estudio, ilustrando cómo este enfoque permite una representación más precisa de las rivalidades y relaciones de poder entre los distintos actores implicados en el sector energético.

2. LA CARTOGRAFÍA COMO PROCESO DE ELECCIÓN

La elaboración de un mapa geopolítico se inicia mucho antes de aplicar cualquier herramienta cartográfica. Constituye un proceso exhaustivo que requiere la recolección y representación de una amplia gama de datos geográficos, cuya representación busca trascender la mera información superficial.

2.1. Elegir entre cantidad y valor económico: Claves en la representación cartográfica

En la cartografía energética, resulta esencial decidir si representar las unidades en términos de volumen o valor, una elección decisiva para la interpretación de los mapas. Por ejemplo, el volumen de petróleo se puede medir en litros o barriles, y el gas natural en metros cúbicos. Alternativamente, es posible optar por representar el valor económico, como comúnmente se realiza en los intercambios internacionales de energía, utilizando el dólar como unidad estándar. Esta selección impacta profundamente en cómo se interpreta el mapa. Por ejemplo, si destacamos los volúmenes de gas natural, Irán podría ser percibido como un actor dominante global debido a que comparte con Qatar el mayor yacimiento del mundo (North Dome/South Pars) Sin embargo, esta perspectiva omite las sanciones económicas que restringen su capacidad de exportación, un detalle que se haría evidente si se enfocara en el valor de las exportaciones de gas.

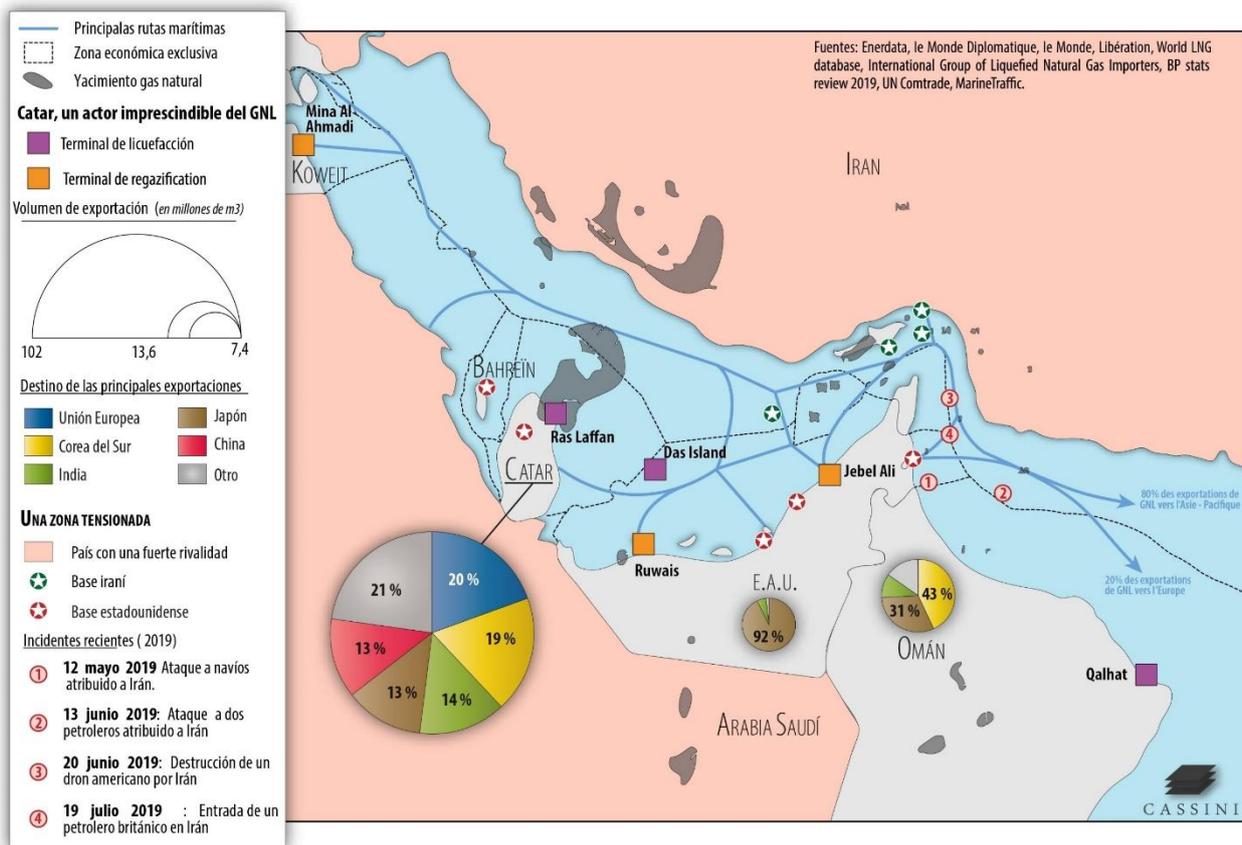


Figura 1: GNL en el Golfo Pérsico: producción bajo presión

Por lo tanto, un mapa que solo muestre volúmenes puede distorsionar la verdadera posición de Irán en el mercado global del gas. Un caso análogo es el análisis de las exportaciones de gas y petróleo del Golfo en 2020. Inicialmente, empleamos el dólar como unidad común para todas las energías, pero pronto observamos que Qatar parecía menos significativo comparado con los EAU y Arabia Saudita, a pesar de ser el tercer mayor exportador de gas del mundo. Esto se debía a que la demanda de petróleo, más elevada que la de gas, sesgaba la comparación. Al modificar la comparativa a los volúmenes de energía exportados por tipo, la perspectiva cambió radicalmente, destacando a Arabia Saudita como el principal exportador de petróleo y a Qatar

como el líder en exportaciones de gas. Estos ejemplos demuestran cómo la elección de las unidades en la cartografía energética no solo afecta la representación geográfica de los recursos, sino también la interpretación geopolítica de los datos, resaltando la necesidad de combinar distintos conjuntos de datos para revelar las auténticas dinámicas y tensiones geopolíticas.

2.2. Combinar adecuadamente los datos para mostrar el problema subyacente.

En otro caso de estudio, buscamos comprender los desafíos geopolíticos del mercado global de producción de uranio. Por ejemplo, aunque Australia posee las reservas más abundantes, no lidera la producción mundial; en 2021, solo contribuyó con el 8%, quedando muy por detrás de Kazajistán. Este último, con reservas menores (15% comparado con el 28% de Australia), lideró con el 45% de la producción. Una de las razones principales de esta disparidad es el costo variable de extracción. En Australia, extraer uranio es económicamente viable solo si supera los 80 dólares por tonelada, mientras que, en Kazajistán, la mayor parte de las reservas se explotan por menos de 80 dólares. Para visualizar esta situación en un mapa, resulta esencial integrar tres tipos de información: el volumen de las reservas globales, la participación de cada país en la producción mundial y el costo de extracción. Decidimos representar estas dimensiones en un único mapa para demostrar cómo el costo de extracción influye en la producción de este mineral estratégico. Utilizamos un sistema de colores planos para mostrar la proporción de producción de cada país y dividimos los círculos en dos colores para diferenciar las reservas explotables por encima y por debajo de los 80 dólares por tonelada. Este enfoque reveló primero la falta de correlación entre las reservas y la producción mundial, aunque la realidad es mucho más compleja. Factores como la estabilidad política, la seguridad, la infraestructura y las políticas energéticas nacionales también impactan la producción de uranio. Por ejemplo, Canadá, a pesar de los altos costos, sigue siendo uno de los mayores productores mundiales, mientras que China y Brasil, con reservas significativas, producen poco uranio, en parte por la decisión de preservar sus propios recursos y optando en cambio por abastecerse del mercado internacional.

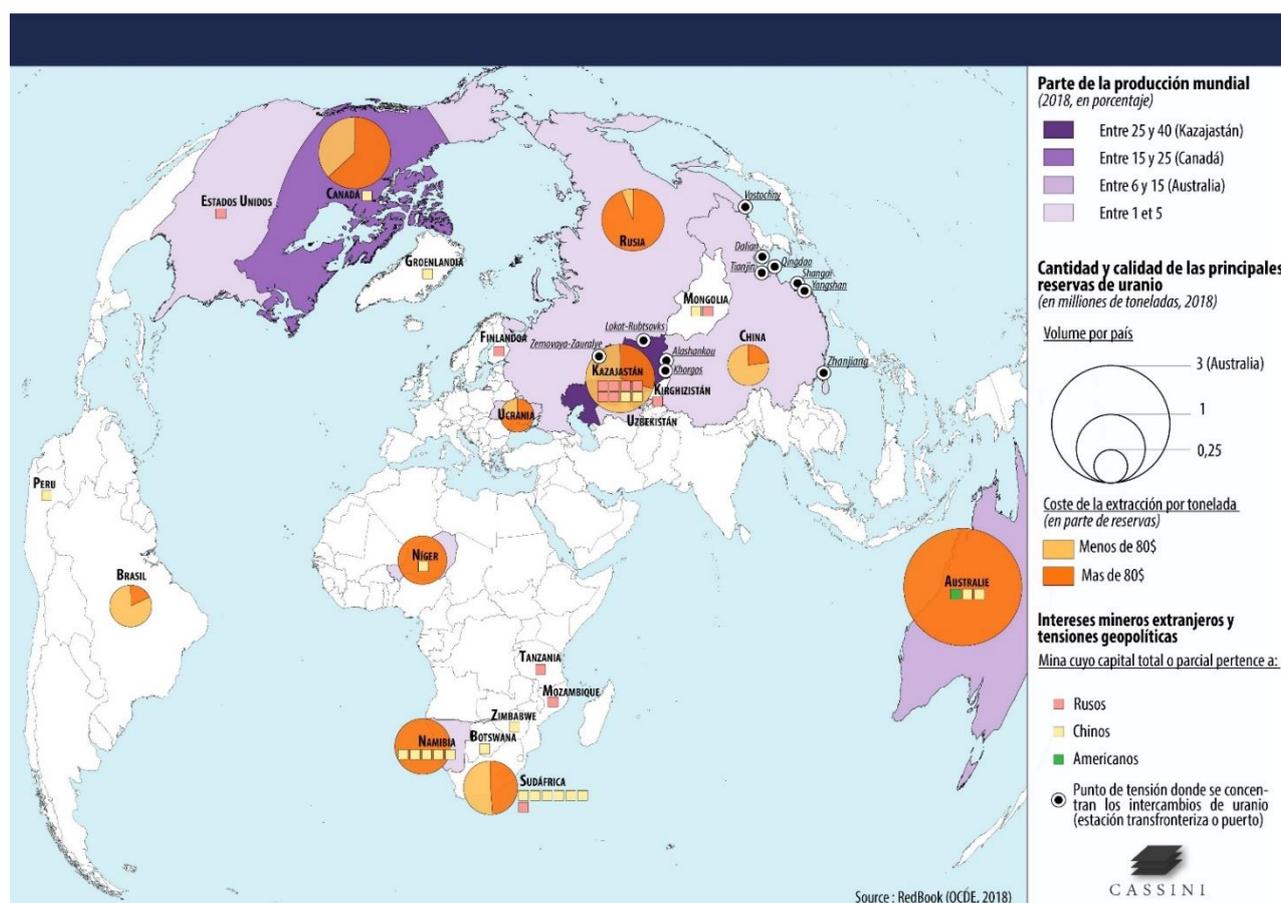


Figura 2: Recursos y producción de uranio: ¿cuáles son las cuestiones económicas y geopolíticas?

El propósito de nuestra cartografía no es por tanto abarcar todos los detalles, lo que podría comprometer la claridad, sino centrarse en uno o dos mensajes clave, empleando diversos formatos si es necesario para fortalecer el análisis.

2.3. Es esencial considerar las distintas fases de la cadena de valor en el sector energético.

Al igual que en otros sectores, el ámbito energético es complejo y su explotación implica múltiples etapas de transformación de recursos extraídos para obtener productos como baterías, minerales refinados o nuevas energías como el hidrógeno. En estas etapas, emergen nuevos actores y rivalidades en contextos territoriales variados. A menudo, se focaliza demasiado en una forma de energía sin percibir los verdaderos desafíos geopolíticos, que suelen estar en otras fases de la cadena de valor. Un ejemplo claro es el sector del cobalto, donde China, sin tener reservas propias, domina el mercado mediante la influencia en varias etapas de la cadena de valor. A pesar de que la República Democrática del Congo (RDC) posee las principales reservas y es el mayor productor mundial, la mayoría de su producción es exportada a China. Esto se debe a la presencia de compañías mineras chinas en la RDC que controlan la extracción y el primer paso hacia el dominio del mercado del cobalto refinado, utilizado en la fabricación de baterías eléctricas.

Con menos del 2% de la producción mundial de cobalto bruto, China produce más del 70% del cobalto refinado global gracias a sus refinerías, que procesan el material bruto localmente. Este análisis se logró combinando diversas bases de datos sobre la producción y el comercio de cobalto, tanto bruto como refinado, y reveló la importancia de considerar todas las etapas de la cadena de valor para entender completamente los desafíos geopolíticos del sector.

Este método de análisis se ha aplicado también a otros minerales estratégicos como el níquel y el manganeso, donde China, aunque contribuye mínimamente a la producción bruta mundial, lidera significativamente en la producción refinada. Este enfoque ha permitido descifrar y exponer la estrategia de dominio de China en el sector de los minerales estratégicos necesarios para la industria energética.

3. ADOPTAR UNA PERSPECTIVA GEOPOLÍTICA PARA INTERPRETAR LOS DESAFÍOS ENERGÉTICOS.

La creación de un mapa geopolítico depende de la recopilación adecuada de datos que deben ser correctamente interpretados y analizados para identificar los desafíos principales. No obstante, esto no es suficiente. También es necesario aplicar un razonamiento geopolítico, es decir, analizar una situación mediante un enfoque que busca comprender las rivalidades entre actores y las dinámicas de poder sobre o para ciertos territorios. Sin esta perspectiva, incluso teniendo todas las bases de datos necesarias, no se garantiza la producción automática de un mapa geopolítico relevante.

3.1. Convertir los datos en información estratégica.

Hasta ahora, hemos discutido la relevancia de los datos en la elaboración de mapas geopolíticos. No obstante, es fundamental reconocer que los datos brutos son típicamente neutrales y objetivos. Únicamente su interpretación mediante un enfoque geopolítico los convierte en información estratégica de valor. Tomemos, por ejemplo, el análisis de la estrategia global de China en el ámbito de los minerales estratégicos. Este revela que las empresas mineras privadas chinas no solo buscan beneficios económicos al obtener concesiones para explotar recursos en países en desarrollo, especialmente en África, sino que también son instrumentos de una política más amplia para controlar recursos estratégicos globales.

Dicha perspectiva geopolítica nos impulsa a profundizar en la información recopilada y a interrogar las verdaderas dinámicas de poder y los desafíos emergentes en el sector energético. Por ejemplo, un estudio detallado sobre la ubicación de fábricas de baterías eléctricas muestra una intensa rivalidad económica e industrial entre China y Estados Unidos, con un predominio chino debido a su elevado número de instalaciones productivas. Un análisis más exhaustivo, que considera la nacionalidad de las empresas que poseen estas fábricas, modifica nuestra comprensión de los equilibrios de poder. Más de la mitad de las fábricas en Estados Unidos son de propiedad china, al igual que la mayoría en Alemania. En contraste, la gran mayoría de las instalaciones en Corea del Sur son de empresas locales, que además han expandido sus operaciones internacionalmente. Este caso subraya la necesidad de trascender los datos elementales y enriquecerlos con información que aporte una visión geopolítica más amplia, esencial para comprender los retos reales del sector.

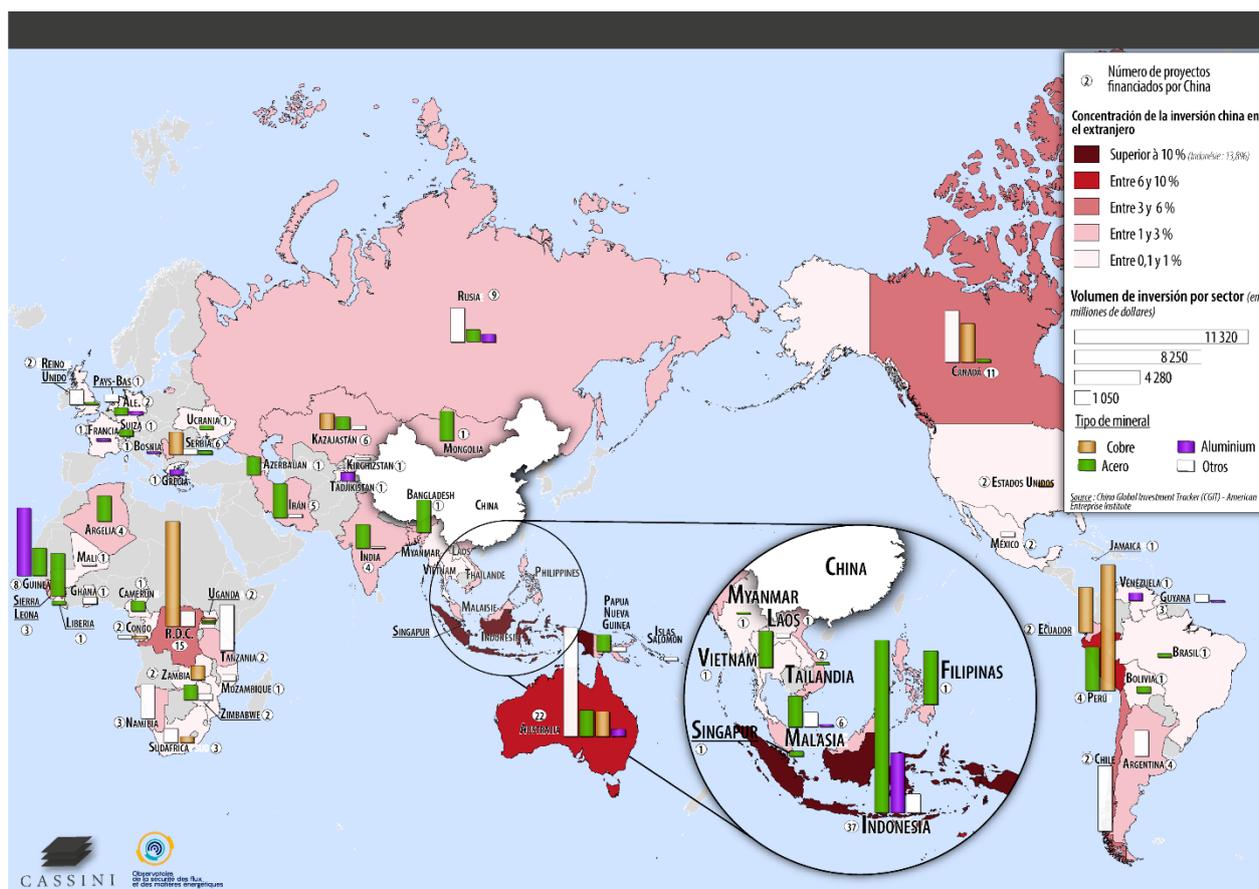


Figura 3: Las principales inversiones chinas en el extranjero en el sector de los minerales

3.2. Deconstruir las representaciones

Adoptar una perspectiva geopolítica para abordar los desafíos energéticos conlleva también analizar las percepciones de los distintos actores sobre el sector y contrastarlas con la realidad observada. Un ejemplo notable es el del hidrógeno. En septiembre de 2020, Francia desveló un ambicioso plan de más de siete mil millones de euros para impulsar este sector y desarrollar una industria nacional. Similares ambiciones fueron expresadas por la Unión Europea, así como por otros países, incluidos China y Estados Unidos, presentando al hidrógeno como una alternativa ecológica a los combustibles fósiles. El reto no residía en la obtención de datos, sino en seleccionar la información pertinente de la abundancia de informes y estudios disponibles. Optamos por fundamentar nuestras cartografías en la base de datos de la Agencia Internacional de la Energía, que detallaba todas las plantas y proyectos a nivel mundial, ofreciendo información sobre el progreso de los proyectos y los tipos de hidrógeno producido: el "azul", obtenido de fuentes fósiles mediante la captura de CO₂, y el "verde", derivado de fuentes renovables. De los 693 proyectos que examinamos, el 90% estaba dedicado al hidrógeno verde, representando el 80% del volumen de producción planificado, con países como España y Australia a la cabeza. Un examen más detallado reveló que solo una cuarta parte de los proyectos estaba en funcionamiento y que la producción de hidrógeno estaba concentrada en unos pocos países, mayoritariamente a partir de fuentes fósiles. Pese a las promesas de un futuro dominado por el hidrógeno verde, la mayoría de los proyectos en desarrollo todavía se fundamentaban en fuentes fósiles. Esta discrepancia entre los discursos políticos y la realidad del mercado del hidrógeno subraya la importancia de interpretaciones geopolíticas que trasciendan los datos elementales. Este enfoque no solo modifica nuestra comprensión de los equilibrios energéticos actuales, sino que también nos invita a reflexionar sobre cómo se podrían representar los mismos datos de manera distinta para ofrecer una visión alternativa.

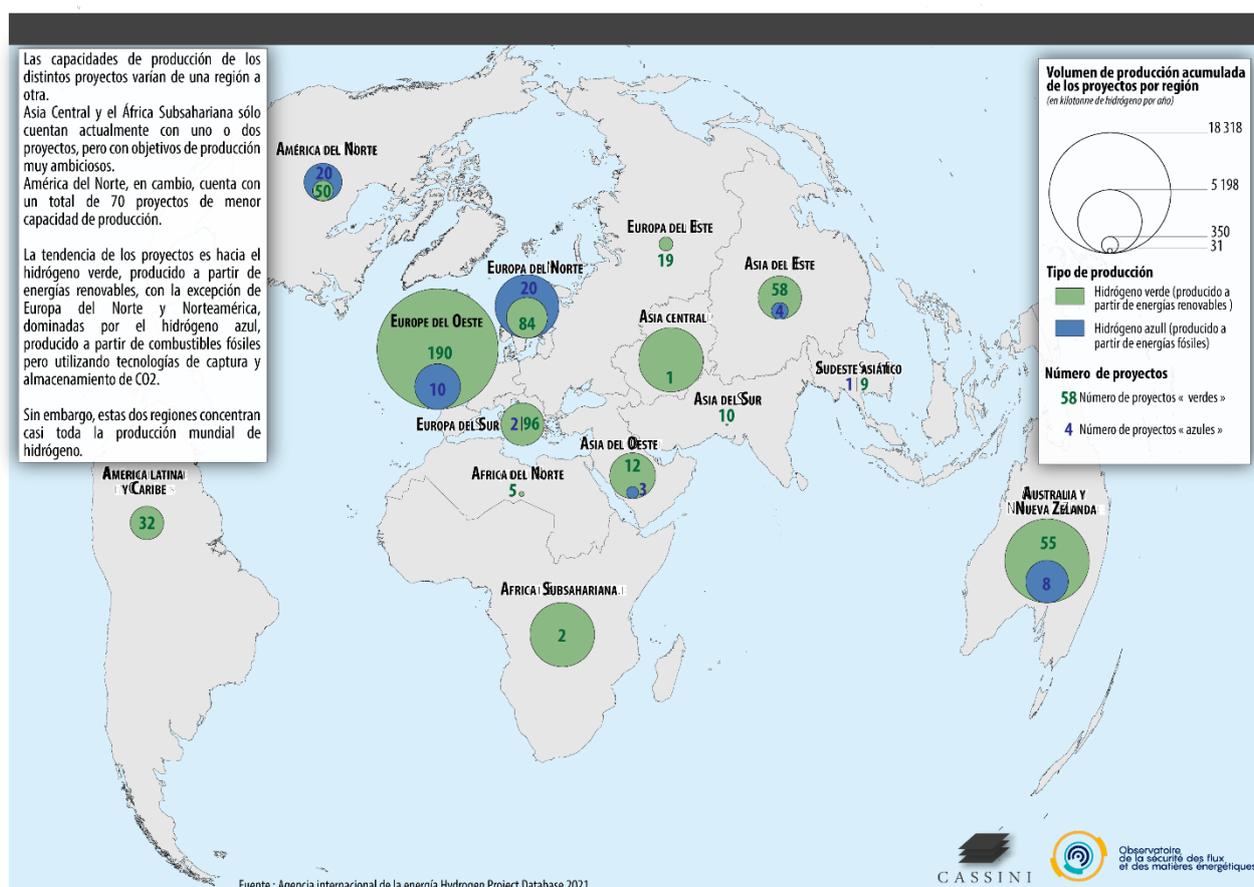


Figura 4: Anuncio de proyectos de producción de hidrógeno en todo el mundo

4. CONCLUSIÓN

La presente investigación ha propuesto una metodología específica para la elaboración de cartografía geopolítica en el ámbito energético, fundamentada en la utilización de Sistemas de Información Geográfica (SIG). El análisis de diversos casos ha evidenciado cómo estas herramientas facilitan una representación más nítida de los patrones geoespaciales y una interpretación más exhaustiva de las dinámicas de poder en el contexto energético global. Los resultados obtenidos ponen de manifiesto que la síntesis de datos cuantitativos y cualitativos, en conjunción con un enfoque geopolítico, resulta esencial para representar las complejas interacciones entre los actores del sector energético. La metodología propuesta amplía la comprensión de los desafíos contemporáneos y proporciona un instrumento adaptable a las transformaciones del panorama energético mundial. Este planteamiento conlleva implicaciones relevantes tanto en el ámbito académico como en el profesional, ofreciendo un marco analítico sólido para el desarrollo de estrategias más informadas en un entorno complejo. En prospectiva, se vislumbra la potencial aplicación de este método más allá del sector energético, con posibilidades de adaptación a áreas como la seguridad alimentaria, la gestión de recursos hídricos o el análisis de flujos migratorios. En síntesis, la metodología propuesta contribuye significativamente a la comprensión de las dinámicas del sector energético y se erige como una herramienta valiosa para la navegación de la complejidad global. La integración del potencial analítico de los SIG con una interpretación geopolítica rigurosa establece las bases para abordar los desafíos del siglo XXI.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Lacoste, Y. (2012). Geography, geopolitics, and geographical reasoning. *Herodote*, 146147(3), 14-44.
- Loyer, B. (2022). *Introducción a la Geopolítica: conceptos y métodos*. Editorial Síntesis.
- Ansellem, D. (2023). De l'importance de bien cartographier les enjeux énergétiques: retour d'expérience. *Herodote*, 188(1), 27-40.

Creación de un sistema de información del planeamiento urbanístico y territorial de Mallorca

A. Fornés Horrach¹, X. Guaita Mas²

¹ Servicio de Ordenación del Territorio de la Dirección Insular de Territorio y Paisaje del Departamento de Territorio, Movilidad e Infraestructuras, Consell de Mallorca. General Riera 113, 07010 Palma (Illes Balears).

² Servicio de Proyectos de Modernización de la Dirección Insular de Modernización, Transparencia e Innovación del Departamento de Presidencia, Consell de Mallorca. General Riera 113, 07010 Palma (Illes Balears).

afornes@conselldemallorca.net, fguaita@conselldemallorca.net

RESUMEN:

El sistema de información del planeamiento urbanístico y territorial de Mallorca que se presenta se crea con la finalidad de garantizar la publicidad de los instrumentos de planeamiento urbanístico, de ordenación del territorio y otros instrumentos de ordenación y gestión urbanística, permitiendo a la ciudadanía la consulta pública de estos instrumentos por medios telemáticos, incrementando así la transparencia en los procesos de toma de decisiones mediante la utilización de las nuevas tecnologías de la información, al mismo tiempo que se avanza hacia la modernización de la administración.

Los objetivos principales de este sistema de información son permitir la consulta de los expedientes de un municipio, diferenciando entre vigentes e históricos, permitir consultar la información detallada de un expediente en particular, visualizar los documentos tanto textuales como cartográficos de un expediente en concreto, permitir la búsqueda de expedientes por tipo de planeamiento, trámite, fecha de aprobación y palabra clave, así como permitir la búsqueda de parcela catastral y consultar los documentos cartográficos que se superponen a dicha parcela.

El sistema de información consta de tres componentes principales: la base de datos, el visor web y la aplicación de carga y documentación de los nuevos expedientes, así como de control de vigencia de estos. La base de datos es documental (NoSQL) y almacena tanto los datos estructurados de la normativa urbanística como los diferentes ficheros textuales y cartográficos que la componen. La normativa se publica mediante una API REST, del que se alimenta el visor web, permitiendo también el acceso a aplicaciones de terceros.

Palabras-clave: Sistema de información, planeamiento urbanístico, visor web, Mallorca.

1. INTRODUCCIÓN

El Consell de Mallorca es la institución de gobierno de la isla de Mallorca, con competencias en urbanismo y ordenación del territorio, y asistencia técnica a los municipios, especialmente a los con menor capacidad económica y de gestión.

Ante la problemática de la existencia de una aplicación obsoleta para la publicidad del planeamiento urbanístico de los municipios, de difícil mantenimiento y con la imposibilidad de actualización de los datos, así como ante la necesidad de avanzar hacia la modernización de la administración pública, maximizar la transparencia y dar acceso a la información pública a la ciudadanía siguiendo los principios de la Directiva INSPIRE (2007), la Ley 14/2010 LISIGE y la Directiva relativa a los datos abiertos y la reutilización de la información del sector público (2019), se crea el sistema de información del planeamiento urbanístico y territorial de Mallorca, con el fin de garantizar la publicidad de los instrumentos de planeamiento urbanístico, de ordenación del territorio y otros instrumentos de ordenación y gestión urbanística vigentes, permitiendo la consulta pública de estos instrumentos por medios telemáticos, incrementando así la transparencia en los procesos de toma de decisiones mediante la utilización de las nuevas tecnologías de la información, al mismo tiempo que se avanza hacia la modernización de la administración.

Con la misión de constituir un repositorio digital único del planeamiento urbanístico y territorial de

Mallorca en la institución insular y con la visión de conseguir que dicha información sea interoperable, abierta y disponible se crea el sistema de información del planeamiento urbanístico y territorial de Mallorca.

Los objetivos principales de este sistema de información son permitir la consulta de los expedientes de un municipio, diferenciando entre vigentes e históricos, permitir consultar la información detallada de un expediente en particular, visualizar los documentos tanto textuales como cartográficos de un expediente en concreto, permitir la búsqueda de expedientes por tipo de planeamiento, trámite, fecha de aprobación y palabra clave, así como permitir la búsqueda de parcela catastral y consultar los documentos cartográficos superpuestos a dicha parcela.

2. METODOLOGÍA

2.1. Desarrollo conceptual

El sistema de información consta de tres componentes principales (Figura 1): la base de datos, el visor web y la aplicación de carga y documentación de los nuevos expedientes, así como de control de vigencia de estos. La base de datos es documental (NoSQL) y almacena tanto los datos semiestructurados de la normativa urbanística como los diferentes ficheros textuales y cartográficos que la componen. La normativa se publica mediante una API REST, del que se alimenta el visor web, permitiendo también el acceso a aplicaciones de terceros.

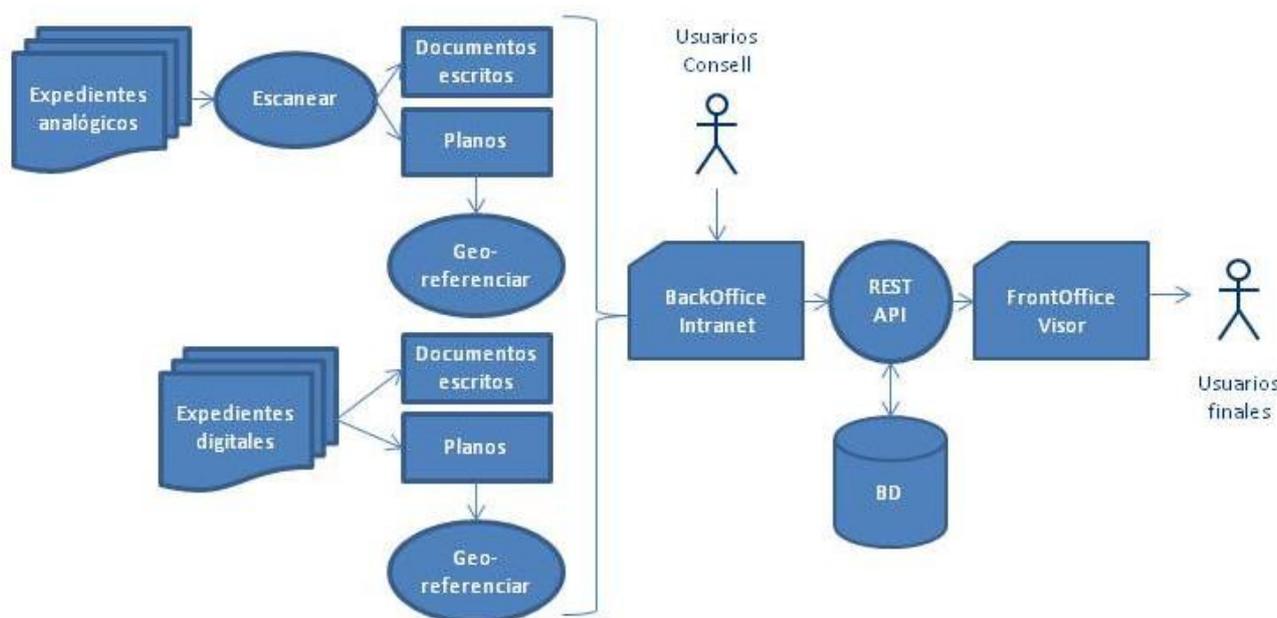


Figura 32. Esquema de composición del Sistema de Información del Planeamiento Urbanístico y Territorial de Mallorca

2.2. Desarrollo conceptual

Para gestionar los datos de la normativa urbanística en lugar de la típica estructura tabular de una base de datos relacional se ha optado por una solución NoSQL, concretamente MongoDB (MongoDB Community Edition, 2024) que almacena los datos como documentos JSON. La solución se adapta bien a las características de datos semiestructurados de las normativas como conjuntos dispares de ficheros organizados en carpetas (acuerdos, informes, carpetas de planos...) y permite diferentes esquemas de datos entre documentos.

La base de datos gestiona dos tipos principales de colecciones (en terminología de MongoDB):

- Municipios: información de si dispone de normativa (actualmente todos), si dicha normativa está adaptada al plan territorial insular y si se ve afectado por normativas supramunicipales.

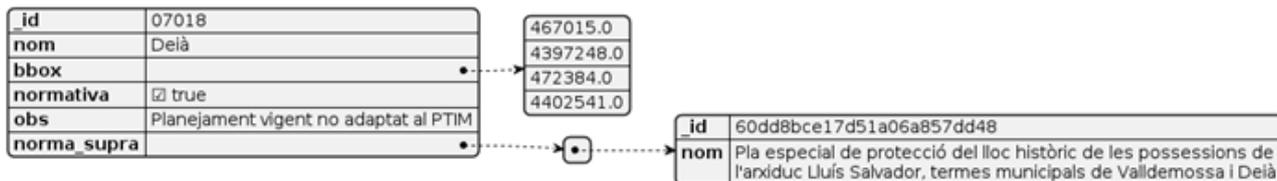


Figura 33. Ejemplo de datos de un municipio

- Normativas: gestiona metadatos de la normativa y su contenido documental (ficheros públicos y de acceso restringido) organizados en carpetas.

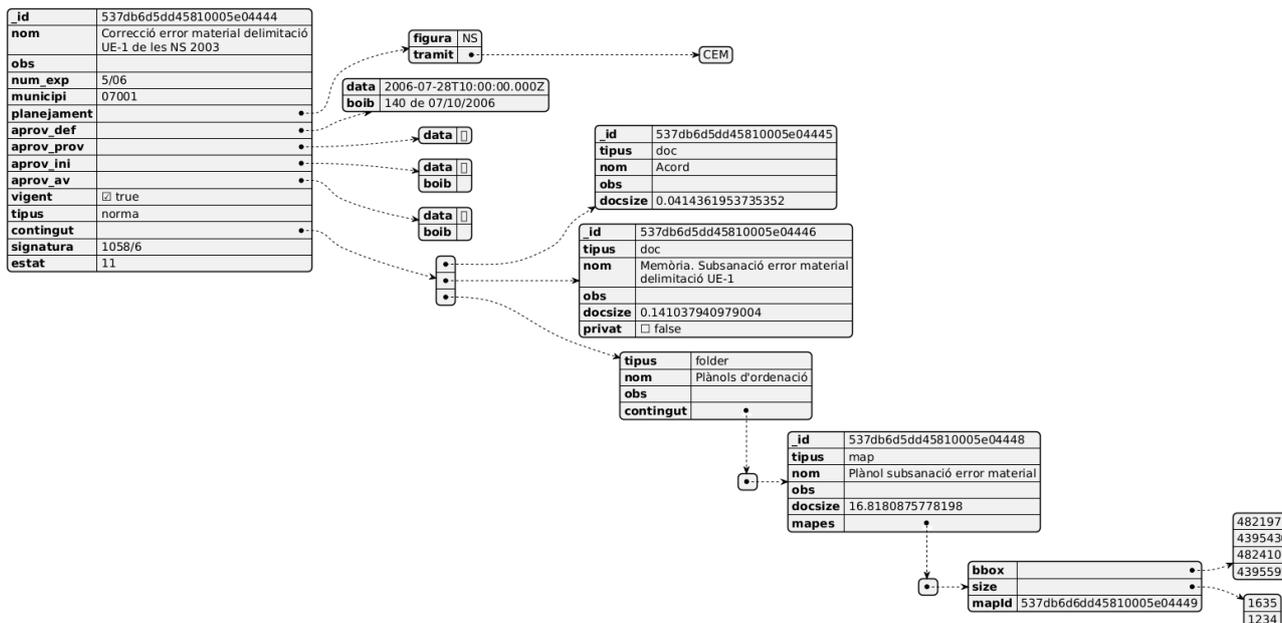


Figura 34. Ejemplo de datos de una normativa

Todos los ficheros de las normativas, tanto documentos (acuerdos, informes...) como planos (en su tamaño original) e imágenes georeferenciadas se almacenan en la propia base de datos.

2.3. Aplicación interna de gestión del Sistema de Información (BackOffice)

El *backoffice* de gestión de la normativa urbanística es una aplicación Java de servidor publicada en la Intranet del Consell de Mallorca con acceso restringido a los técnicos del área de Urbanismo y Territorio mediante roles de administración, edición o consulta.

Se ha implementado con ZK (ZK Framework, 2024), un framework Java de código abierto basado en componentes de interfaz de usuario, que sigue un patrón de diseño MVVM (*Model-View-ViewModel*). ZK combina la definición de la lógica de negocio y el diseño de la interfaz de usuario en el servidor con las tecnologías del lado del cliente como Ajax (*Asynchronous JavaScript And XML*) para obtener aplicaciones web con un alto grado de interactividad.

2.3.1. Procedimiento de digitalización de los expedientes de planeamiento urbanístico y territorial

Se establece un protocolo de escaneo de los documentos textuales de los expedientes analógicos generándose tantos documentos digitales como documentos analógicos existan, en formato PDF, a color, con una resolución de 200 píxeles por pulgada (ppp) y con activación del reconocimiento óptico de caracteres (OCR).

Concerniente a los documentos textuales de los expedientes digitales se transforman los documentos PDF originales activándose el OCR.

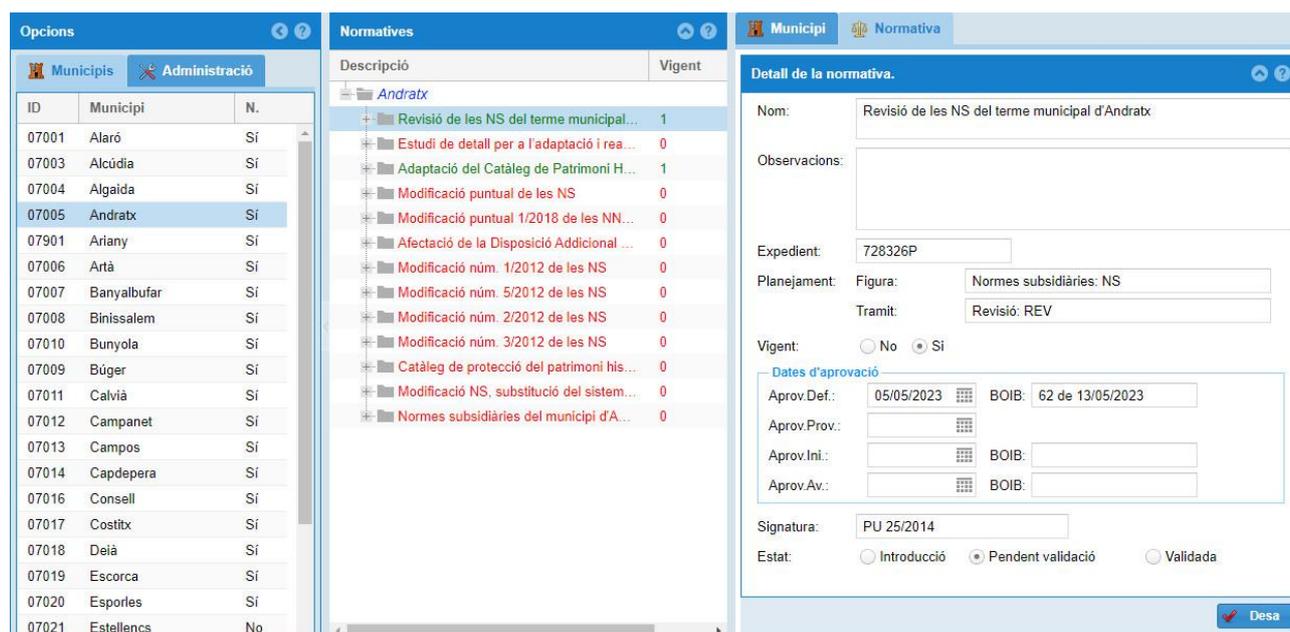


Figura 35. Interfaz de la aplicación interna de gestión del Sistema de Información

2.3.2. Procedimiento de georreferenciación de los planos cartográficos digitalizados

Referente a los planos cartográficos de los expedientes analógicos se escanean a tamaño real y se guardan en formato TIFF y compresión LZW. Paralelamente se crea una copia de cada plano en formato PDF.

Relativo a los planos de los expedientes digitales se guardan individualmente en formato TIFF para su posterior georreferenciación, así como también se guardan individualmente en formato PDF

Los planos de ordenación vigentes se georreferencian con el software QGIS utilizando la herramienta Georeferenciador y con la herramienta Clipper se recortan y se guardan en formato JPG juntamente con el archivo de georreferenciación asociado en formato JGW. También hay un procedimiento de extracción de la leyenda.

2.3.3. Carga de los archivos del expediente y documentación de estos

Finalmente, a través de la aplicación interna, cabe realizar la carga de todos los documentos del expediente y la descripción de estos, así como del expediente en general.

2.4. Visor web del planeamiento urbanístico y territorial de Mallorca (*FrontOffice*)

El *frontoffice* de consulta es una aplicación de navegador (html + css + javascript) que obtiene toda la información mediante llamadas a una API REST. Se ha implementado con ExtJS (Sencha ExtJS, 2024), *framework* de interfaz de usuario de Sencha en su última versión GPL⁶, y OpenLayers (OpenLayers 2, 2024), librería de *webmapping*⁷.

2.4.1. Funcionalidades principales

- Selección de municipio
- Normativa
 - Relación de la normativa urbanística vigente y no vigente del municipio y la supramunicipal que le afecta

⁶ <https://cdn.sencha.com/ext/gpl/4.2.1/release-notes.html>

⁷ <https://github.com/openlayers/ol2/blob/master/notes/2.13.md>

- Visualización y descarga de los documentos y planos aprobados
- Mapa
 - Cambiar el mapa base
 - Superponer información auxiliar (WMS predefinidos por el administrador del servicio) y planos normativos georeferenciados con control del grado de transparencia
- Búsquedas: por título, fechas, número de expediente, observaciones, tipo de planeamiento o trámite y afección a parcelas catastrales

3. RESULTADOS

A finales de enero de 2022 se publica el visor del Archivo de Urbanismo en la página web del Consell de Mallorca, habiéndose incorporado el planeamiento vigente de todos los municipios de Mallorca hasta la fecha, excepto Palma, del cual solo se incorporó el planeamiento vigente desde el 1 de enero de 2015. Así, al publicarse el visor se habían incorporado 633 expedientes.

Hasta mayo del año 2024 el número de expedientes ha ascendido a 706, habiéndose incorporado 8901 documentos y georreferenciado 4681 planos cartográficos.

Referente al uso del visor, en los primeros 5 meses del año 2024 ha tenido una media de 1126 visitas mensuales, se descargaron una media mensual de 700 documentos y de 1331 mapas, y se realizaron una media mensual de 184 búsquedas y se geolocalizaron 928 mapas. En relación con la evolución del uso del visor, mientras que el número de visitas y el número de documentos descargados ha tenido una evolución positiva, la evolución del número de planos descargados, planos geolocalizados y número de búsquedas ha sido desigual (Figura 6).

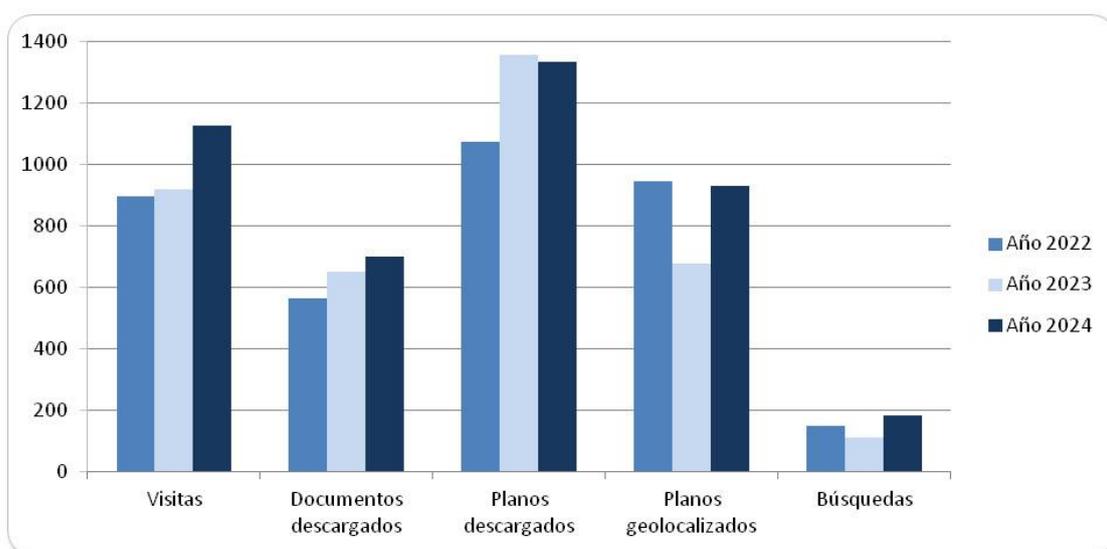


Figura 36. Medias mensuales de uso en los años 2022, 2023 y 2024

4. CONCLUSIONES

El visor web del planeamiento urbanístico y territorial de Mallorca presenta importantes ventajas, entre las cuales cabe destacar: la claridad expositiva de la documentación que contiene, la posibilidad de búsqueda en la documentación escrita, la disponibilidad de los planos en formato PDF y tamaño original, la certeza de que la documentación disponible es la aprobada de forma definitiva o la posibilidad de distinguir entre documentación vigente y la que no.

Las distintas funcionalidades del visor lo convierten en una herramienta de gran utilidad técnica, que permite agilizar el trabajo del usuario y apoyar a la toma de decisiones.

En todo caso, cabe resaltar la necesidad de mantener los datos actualizados, incorporando los últimos expedientes aprobados, y actualizando la descripción de los distintos documentos incorporados, para mantener y afianzar la fiabilidad en el uso del visor.

Por otra parte, se tiene previsto actualizar la aplicación interna con tecnología más moderna y con una interfaz más intuitiva y amigable, así como hacer pública la API.

5. BIBLIOGRAFÍA

España. Ley 14/2010, de 5 de julio, sobre las infraestructuras y los servicios de información geográfica en España

MongoDB Community Edition (2024). General-purpose document database [Base Software]. <https://www.mongodb.com/products/self-managed/community-edition>

OpenLayers 2 (2024). JavaScript web mapping library [Dev Software]. <https://openlayers.org/two/>

QGIS Association (2002). QGIS Geographic Information System (3.4.12-Madeira) [Software]. <http://www.qgis.org>

Sencha ExtJS (2024). JavaScript framework for building cross-platform web and mobile applications [Dev Software]. <https://www.sencha.com/products/extjs/>

Unión Europea. Directiva (UE) 2007/2 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 14 de marzo de 2007, por la que se establece una infraestructura de información espacial en la Comunidad Europea (Inspire).

Unión Europea. Directiva (UE) 2019/1024 2 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 20 de junio de 2019, relativa a los datos abiertos y la reutilización de la información del sector público.

ZK Framework (2024). Open source Java framework for building enterprise web applications [Dev Software]. <https://www.zkoss.org/product/zk>

Empleo de diferentes tecnologías de información geoespacial para el análisis de la iluminación en entorno urbano y su impacto en la ciudadanía

E. Usobiaga Ferrer¹, A. Egusquiza Ortega¹, P. De Agustín Camacho¹, M. Benedito Bordonau¹, A. Lopez De Aguilera¹.

¹TECNALIA, Basque Research and Technology Alliance (BRTA). Parque Científico y Tecnológico de Bizkaia Astondo Bidea, Edificio 700, 48160 Derio (Bizkaia).

elena.usobiaga@tecnalia.com, <https://orcid.org/0000-0003-3992-4676>

aiziber.egusquiza@tecnalia.com, <https://orcid.org/0000-0003-1051-6580>

pablo.deagustin@tecnalia.com, <https://orcid.org/0000-0001-9715-0803>

mauricia.benedito@tecnalia.com, <https://orcid.org/0000-0002-9069-4338>

amaia.lopezdeaquileta@tecnalia.com <https://orcid.org/0000-0003-1827-627>

RESUMEN: En el marco del proyecto europeo ENLIGHTENme se ha desarrollado una plataforma web georreferenciada multiescalar que analiza la vulnerabilidad de las personas en torno a la iluminación en tres ciudades europeas.

El objetivo del proyecto es desarrollar políticas innovadoras para mejorar la salud y el bienestar de la ciudadanía a través de la iluminación. En ese marco, la plataforma sirve de apoyo en diferentes estadios del proyecto: primero para la selección de los distritos a analizar, y posteriormente, para contextualizar los análisis clínicos que se realizan con una muestra de personas mayores de estos distritos.

Dicha plataforma combina mapas temáticos en 2D accesibles desde un visor web de información georreferenciada basado en Azure Maps, con el modelo 3D de los distritos seleccionados sobre un visor desarrollado sobre Cesium.

Para los mapas 2D se generan indicadores de vulnerabilidad social, urbana, de iluminación y de salud, sintetizándolos en índices por dominio y en un índice combinado para seleccionar los distritos vulnerables.

Sobre estos distritos se analiza a escala intraurbana la iluminación artificial y la iluminación natural a través de procesado de información satelital y LiDAR. Por otro lado, se modelan los edificios del distrito en 3D, asignándoles sus características básicas y calculando indicadores relativos a la iluminación natural interior de las viviendas a partir de sus características geométricas.

Palabras-clave: iluminación, 3D, LiDAR, Cesium, ciudades.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Contexto

La luz moldea los espacios urbanos y la vida social, ya sea en casa o en espacios públicos, afectando al comportamiento, los estados de ánimo, las relaciones sociales, así como la sensación de seguridad percibida por las personas. La iluminación puede aumentar el sentido de confianza de los ciudadanos hacia la ciudad y sus habitantes, fomentando el sentido de permanencia y la socialización dentro de la comunidad urbana. Pero un subproducto subestimado de la urbanización es el aumento de la exposición a la luz artificial nocturna, que afecta negativamente la salud al alterar los ritmos circadianos. Esta interrupción puede predisponer a enfermedades como el cáncer, la neurodegeneración y problemas psiquiátricos, especialmente en los ancianos, quienes ya tienen dificultades con el sueño debido al envejecimiento de sus ojos (Zhao et al. 2019). A pesar del aumento en la conciencia pública sobre los problemas de salud relacionados con la luz y los

productos diseñados para mitigarlos, las políticas municipales de iluminación rara vez consideran los efectos sobre la salud.

Las características urbanas tienen un impacto significativo en la iluminación natural en ciudades como indican Xia and Li (2023), por tanto, los modelos urbanos digitales pueden ser herramientas poderosas para recoger evidencias y demostrar el impacto de la luz en los ciudadanos, ya que pueden integrar una amplia variedad de datos (urbanos, demográficos, socioeconómicos y de salud). Esas evidencias, con componente geoespacial, pueden ayudar a los urbanistas a tomar decisiones informadas sobre ámbitos locales interrelacionados (Urrutia-Azcona et al., 2021), en este caso sobre la planificación y gestión de la iluminación urbana.

El proyecto de financiación europea ENLIGHTENme “*Innovative policies for improving citizens’ health and wellbeing addressing indoor and outdoor lighting*” (Programa H2020, No 94523) tiene como objetivo recopilar evidencia sobre el impacto de la iluminación exterior e interior en la salud y el bienestar humano, mediante el desarrollo y testeo de soluciones y políticas innovadoras que también contrarresten las desigualdades en salud en las ciudades europeas. Para ello ha recopilado y sistematizado el conocimiento existente en la Plataforma Multiescalar de Iluminación Urbana y Salud organizada en dos niveles:

1. Los Mapas de Iluminación Urbana y Salud a nivel de ciudad, que se construyeron para las tres Ciudades ENLIGHTENme (Bologna, Ámsterdam y Tartu)
2. Los modelos multiescalares a nivel de distrito, donde implementó una representación detallada en 3D de los 3 distritos objetivo

La plataforma integra diferentes trabajos de análisis realizados en el proyecto sirviendo así de apoyo a diferentes fases de este. Primeramente, se realiza un análisis de vulnerabilidad para toda la ciudad a escala de distrito, que sirve para la selección del distrito a analizar en cada ciudad. Una vez seleccionado el distrito más vulnerable, se analiza en detalle la iluminación natural y artificial de este, a través del empleo de diferentes tecnologías de análisis de información espacial.

1.2. Fuentes de información empleadas

Podemos dividir las fuentes empleadas en dos secciones principales.

[1] Información para los análisis de vulnerabilidad a escala de distrito, que han consistido en datos demográficos y socioeconómicos (población por grupos de edad, por origen, renta, educación, empleo...), información urbana (disponibilidad y accesibilidad a equipamientos y servicios), información de iluminación (principalmente asociada a las luminarias en espacio público) y de salud (prevalencia o incidencia de enfermedades relacionadas con el impacto en los ritmos circadianos). A excepción de los datos de salud que han requerido peticiones ad hoc, el resto de los indicadores se han obtenido de las ciudades y se han complementado en el caso de los indicadores urbanos con información de OpenStreetMap, Copernicus Urban Atlas.

[2] Información para el análisis de la iluminación: para el análisis de la iluminación artificial se han comprado datos de 10*10km del Jilin-1 satellite constellation, para las simulaciones de luz natural se han empleado datos LiDAR a escala 1*1m de resolución y para el análisis de la edificación y su modelado 3D se ha partido de la geometría vectorial de los edificios y su valor de altura o número de plantas, generando a partir de esto diferentes indicadores geométricos derivados y otros indicadores más complejos a partir de estos.

Para el procesado de datos y geometrías se han empleado diferentes herramientas entre las cuales están QGIS, ArcGIS Pro y FME Form, así como desarrollos propios generados en Java.

2. INDICADORES E ÍNDICES DE VULNERABILIDAD A NIVEL CIUDAD

Los mapas 2D permiten analizar las diferencias entre los distritos de cada ciudad en términos de vulnerabilidad social, urbana, de iluminación y de salud. Se calculan para ello diferentes indicadores a nivel de distrito, que se sintetizan en índices por dominio y en un índice combinado que sirve para priorizar los distritos más vulnerables de cada ciudad.

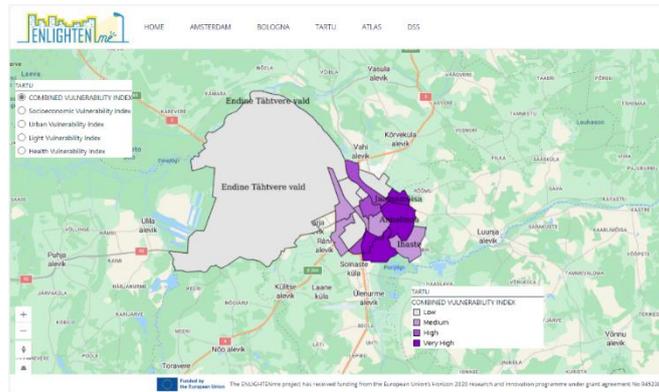


Figura 37 Ejemplo de la visualización del índice combinado para la ciudad de Tartu. Fuente: Proyecto ENLIGHTENme.

Se calculan un total de 29 indicadores por distrito. Para el cálculo de los índices por dominio se aplica el método de *Budget Allocation Process (BAP)* recogido por el manual de la OECD (2008) para definir el peso que cada indicador representa respecto al índice por medio de criterio experto. Una vez obtenidos los pesos de la media de respuestas de varios expertos y habiendo estandarizado los indicadores, se calcula cada índice de dominio por ciudad. Para su representación sobre mapa se divide el resultado de cada índice en cada ciudad en cuatro intervalos por percentiles, clasificando el percentil más bajo como “baja vulnerabilidad”, el siguiente como “media”, y los dos últimos como “alta” y “muy alta”.

Finalmente, para el índice global de vulnerabilidad se sustituyen los valores de baja vulnerabilidad por “0”, media por “1”, alta por “2” y muy alta por “3”, sumando la vulnerabilidad por distrito de los diferentes dominios para tener un único valor, cuyo máximo valor sería 12, que permite priorizar los distritos analizados siempre en relación a los datos de vulnerabilidad de la municipal.

3. ANÁLISIS DE LA ILUMINACIÓN

3.1. Iluminación artificial

Para el análisis de la iluminación artificial se emplean datos satelitales para una zona seleccionada de cada ciudad de 10*10km, obtenidos de la constelación satelital Jilin-1. La información de radiación se calibra en R, G y B a un tamaño de pixel de 1m². Los datos de iluminación se obtienen del RGB y se generan indicadores específicos para un grid hexagonal de 50m². En concreto se calculan los siguientes indicadores: *Average luminance* y *Blue ratio index*.

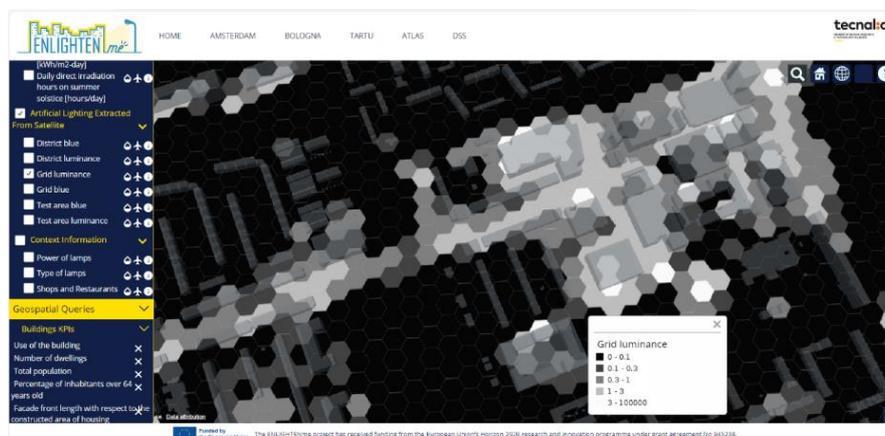


Figura 38 Ejemplo de la luminosidad extraída por satélite. Fuente: Proyecto ENLIGHTENme.

3.2. Simulaciones de la iluminación natural

Para la simulación de iluminación natural se parte de los datos LiDAR o Geotiff provistos por cada ciudad. Estos se preprocesan con espacios de FME Flow para convertirlos a formato Geotiff a escala de 1x1m (Ámsterdam facilita su información original en Geotiff pero a resolución de 0,5x0,5m, lo que conlleva una transformación específica para simplificar el ráster a escala 1x1m). Las celdas sin datos son rellenadas con una estimación en base a sus celdas más cercanas. Levantando de este modo el modelo digital de superficie (DSM en sus siglas en inglés), siguiendo un proceso análogo al descrito por Prieto et al. (2019).

A continuación, se realiza la simulación de la radiación solar para cada hora del año empleando la extensión Spatial Analyst de Arc GIS Pro. De este proceso se extraen la irradiancia global, así como las horas de radiación directa incidente en cada unidad de superficie, obteniendo de ambas cosas indicadores anuales, así como diarios para los solsticios de invierno y de verano. Como resultado de cada uno de estos indicadores se genera un ráster de 1x1m.

3.3. Análisis de la edificación

Para el análisis de la iluminación en la edificación se aplican cuatro indicadores de confort lumínico por edificio, sacados de la metodología de RISAV (Grijalba et al., 2022; Mondrego-Monforte et al., 2023; UPV, 2021), para los indicadores: *Relación entre la longitud de frente de fachada con respecto a la superficie construida*, *Número de orientaciones promedio de las viviendas*, *Fondo edificatorio* e *Incidencia de radiación solar*.



Figura 39 Ejemplo del indicador de orientaciones. Fuente: Proyecto ENLIGHTENme.

Para su aplicación a estas ciudades se emplean dos herramientas principales. Un modelo propio programado en Java que permite extraer diferentes parámetros geométricos de los edificios necesarios para el cálculo de los indicadores (por ejemplo: superficie de fachada exterior o medianera total o por orientación), generados a partir de la geometría y altura del edificio. Y un segundo modelo, generado en FME form, para el cálculo final de los indicadores.

4. PLATAFORMA WEB MULTIESCALAR

La plataforma web desarrollada en el proyecto, incluye diferentes módulos a los que se accede a través de una landing page (ver Figura 4), que supone un único punto de acceso, permitiendo entrar a cada módulo de manera específica para cada una de las tres ciudades analizadas.

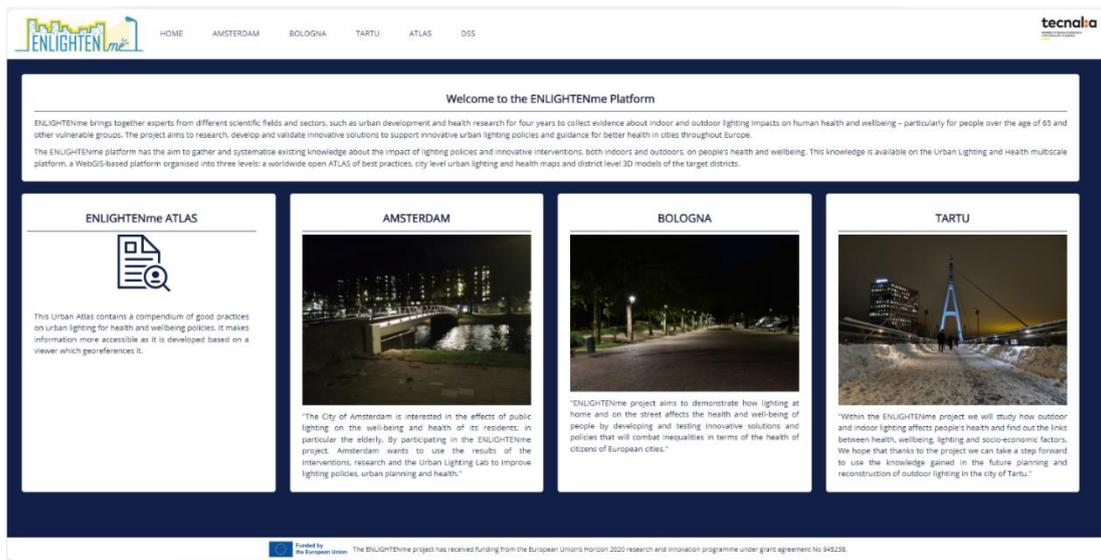


Figura 40 Landing page de la plataforma ENLIGHTENme. Fuente: Proyecto ENLIGHTENme.

En este proyecto se ha optado por la utilización de dos tecnologías de vanguardia: AzureMaps y Cesium. AzureMaps se erige como un destacado visor web especializado en la representación de información georreferenciada, desempeñando un papel fundamental en la visualización de una amplia gama de indicadores a nivel de distrito. Estos indicadores abarcan aspectos cruciales como la vulnerabilidad, la salud y la luminosidad, entre otros aspectos relevantes para el análisis y comprensión de la situación.

Por otro lado, la segunda tecnología seleccionada es Cesium, específicamente la biblioteca en JavaScript conocida como Cesiumjs. Mediante esta herramienta, se ha logrado la integración fluida de mapas detallados en dos dimensiones con modelos tridimensionales de edificios y farolas. Además, se han integrado consultas geoespaciales que permiten representar diferentes indicadores a nivel de edificio. Esta funcionalidad añade una capa adicional de análisis y comprensión, enriqueciendo la experiencia visual y facilitando la interpretación de los datos geoespaciales.

4.1. Visor en Azure Maps (2D)

La plataforma sobre la que apoya el visor de mapas se basa en la API de Azure Maps y permite la visualización de los indicadores e índices desarrollados a nivel de distrito. Los resultados del cálculo se almacenan en una base de datos PostGIS que ha sido conectada a un servidor, Geoserver para crear servicios de mapas OGC para publicar los datos geoespaciales y permitir el acceso desde Azure Maps.

La arquitectura se puede dividir en tres partes principales: Datos, Persistencia, Interoperabilidad y Presentación. De abajo hacia arriba, la capa de datos abarca todos los datos brutos recopilados y calculados en el proyecto que están relacionado con ciudades, mejores prácticas e indicadores. Estos datos contienen información de naturaleza heterogénea (referenciada geográficamente, tabular, contenido multimedia...) y son tratados para ser almacenados utilizando procesos de middleware desarrollados para ello, como scripts de base de datos o diferentes geo-procesos y transformaciones utilizando herramientas como QGIS o FME.

Los datos se almacenan en Azure Database para PostgreSQL con la extensión PostGIS, que está vinculada a un servidor de mapas, Geoserver, que hay desplegado para ello. Se utiliza Geoserver para publicar los servicios de mapas estándar de OGC como WMS que son los más utilizados. La cartografía generada en este proyecto está vinculada entre Geoserver y la base de datos para permitir la interacción y accesibilidad a ambos datos geográficos y alfanuméricos.

Como se ha dicho, los datos y la cartografía presentes en este proyecto se van a presentar en el atlas que es un visor web diseñado para permitir al usuario su descubrimiento y accesibilidad. Este visor trabajará con información utilizando servicios interoperables para comunicarse con los almacenes de datos. Además, también es posible conectarse a otras Plataformas de Datos Abiertos externas a través de esos y utilizar su información para que sea accesible desde la plataforma.

4.2. Modelado 3D

Para el desarrollo del modelo 3D, se ha revisado información de diversas fuentes públicas e institucionales como el catastro o portales de datos abiertos para cada una de las tres ciudades. Para el modelado 3D se cuenta con un espacio de trabajo configurado a través de FME Form para desarrollar las tareas de conversión y transformación de datos en formato 3D Tiles, necesario para su representación en la plataforma.

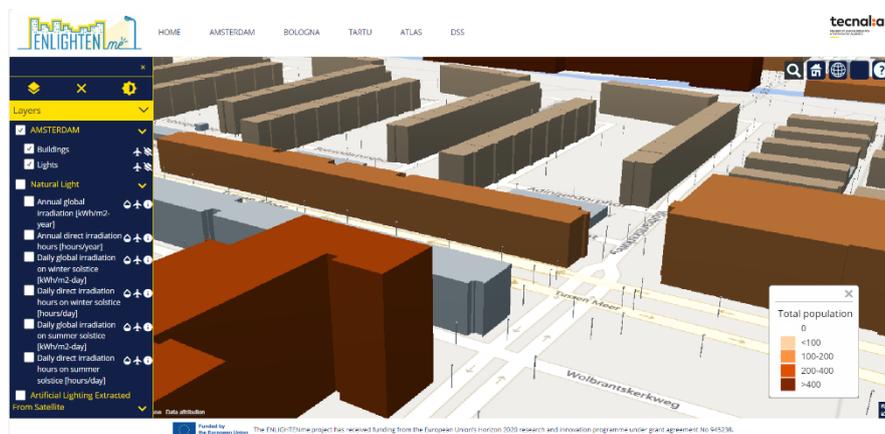


Figura 41 Plataforma con el modelo 3D de la ciudad de Amsterdam. Fuente: Proyecto ENLIGHTENme.

Finalmente, se carga los datos 3D Tiles generados en el visor Cesium 2D & 3D que permite presentar a los usuarios estos modelos urbanos 3D e interactuar con ellos. Además, los modelos integran la información de indicadores (ver **Figura 5**), haciéndolos fácilmente accesibles e interpretables. Como último paso se realiza una validación y comprobación de calidad del modelo 3D generado para asegurar que sea correcto. Por ejemplo, se verifica que los edificios tengan atributos correctos y huellas válidas, y que no haya huecos ni solapamientos entre características adyacentes que puedan afectar a la navegabilidad y usabilidad del modelo 3D. También se verifica que los edificios y las farolas se alineen correctamente con los elementos del mundo real.

4.3. Visor Cesium (2D & 3D)

Para la integración simultánea de mapas en 2D y 3D, se ha seleccionado la biblioteca de JavaScript, Cesium. Esta plataforma de código abierto se destaca por su capacidad para generar globos y mapas tridimensionales con un rendimiento excepcional, calidad visual superior y facilidad de uso.

Adicionalmente, se ha desarrollado una biblioteca personalizada sobre Cesium que ofrece diversas funcionalidades complementarias. Entre estas, se incluye la creación de un menú para la gestión de la visualización de múltiples formatos de datos (WMS, geoJSONs y 3DTiles), la habilitación de consultas, filtrado y descarga de datos, así como la posibilidad de agregar capas de fuentes externas.

5. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

De cara a mejorar el diseño de las ciudades en términos de iluminación, es crucial analizar y diagnosticar su situación de partida. A este respecto y con el fin de contribuir en esta dirección, se aborda una propuesta metodológica para el diagnóstico de las ciudades cuyos resultados son integrados en una herramienta multiescalar.

La integración en una única plataforma de resultados en 2D y 3D resulta muy útil a la hora de la planificación y visualización de la ciudad, pues permite crear representaciones realistas de los entornos urbanos. La creación de estos modelos urbanos implica manejar grandes conjuntos de datos que deben ser gestionados de manera fluida y facilita una toma de decisiones y una gestión informada, eficiente y sostenible. Especialmente para el caso de las políticas de iluminación, permite abordar la planificación urbana optimizando las condiciones de iluminación, mejorando la seguridad, mejorando la calidad de vida de la ciudadanía y logrando a su vez ahorros energéticos y monetarios.

AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos a la Comisión Europea por apoyar el desarrollo del proyecto ENLIGHTENme *“Innovative*

policies for improving citizens' health and wellbeing addressing indoor and outdoor lighting" (Programa H2020, No 94523), así como a las entidades socias del proyecto y las ciudades participantes.

Agradecimientos al grupo de investigación CAVIAR de la Universidad del País Vasco (UPV-EHU).

6. BIBLIOGRAFÍA

- Bing, X., Zhihao, L. (2023). Optimization of residential urban-block morphology based on its synthetic effects on indoor and outdoor natural lighting environments. *Sustainable Cities and Society*, Volume 97, 2023, 104698, ISSN 2210-6707. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104698>
- Grijalba, O., Barrena_Herrán, M., Modrego-Monforte, I. (2022). Riesgo para la salud asociado a la Vivienda y su entorno. Propuesta metodológica para su evaluación. Cuaderno de Investigación Urbanística nº 142 - Seminario VI ISUF-H – mayo / junio 2022 DOI: 10.20868/ciur.2022.142.4888
- OECD (2008). Handbook on constructing composite indicators. Methodology and user guide. European Comission publications. https://www.oecd-ilibrary.org/economics/handbook-on-constructing-composite-indicators-methodology-and-user-guide_9789264043466-en
- Modrego-Monforte, I., Barrena-Herrán, M., Grijalba, O. (2023). A Multi-Criteria Analysis GIS Tool for Measuring the Vulnerability of the Residential Stock Based on Multidimensional Indices. *Land*, 12(8). <https://doi.org/10.3390/land12081551>
- Prieto, I., Izkara, J.L., Usobiaga, E. (2019) The Application of LiDAR Data for the Solar Potential Analysis Based on Urban 3D Model. *Remote Sensing*. 2019, 11, 2348.
- Urrutia-Azcona, K., Usobiaga-Ferrer, E., De Agustín-Camacho, P., Molina-Costa, P., Benedito-Bordonau, M., Flores-Abascal, I. (2021). ENER-BI: Integrating Energy and Spatial Data for Cities' Decarbonisation Planning. *Sustainability* 2021, 13, 383. <https://doi.org/10.3390/su13010383>
- UPV, Grupo CAVIAR. (2021). Método para evaluar la prioridad de las intervenciones de rehabilitación en función del riesgo para la salud asociado a la Vivienda (RISAV). Memoria. Diputación Foral de Gipuzkoa.
- Zhao, J., Warman, G.R., Cheeseman, J.F. (2019). The Functional Changes of the Circadian System Organization in Aging . 2019 Jul; 52:64-71. doi: 10.1016/j.arr.2019.04.006.

Estudio mediante teledetección de las variaciones fenológicas del cereal en Castilla y León y Castilla-La Mancha durante las últimas décadas

Pilar Benito-Verdugo^{1,2}, Ángel González-Zamora¹, José Martínez-Fernández^{1,2}

¹Instituto de Investigación en Agrobiotecnología, CIALE, Universidad de Salamanca, Villamayor, 37185, Salamanca.

²Departamento de Geografía. Universidad de Salamanca, Cervantes, s/n, 37002, Salamanca.

pilarBV@usal.es, <https://orcid.org/0000-0002-6758-0121>

aqlezzamora@usal.es, <https://orcid.org/0000-0002-1145-0803>

jmf@usal.es, <https://orcid.org/0000-0003-0446-9693>

RESUMEN: Este estudio analiza los patrones temporales de la fenología de los cereales de secano extraídos del conjunto de datos GIMMS NDVI3g en las principales regiones cerealistas de España, durante el periodo 1982-2022. Las series anteriores y posteriores del comienzo del siglo XXI fueron analizadas por separado. Se extrajeron los parámetros fenológicos utilizando el método del umbral dinámico modificado, y se analizaron sus tendencias. Además, se realizaron análisis de correlación para determinar la influencia de las variables hidroclimáticas en el inicio (SOS) y fin (EOS) del ciclo fenológico. Los resultados mostraron una inversión y desaceleración temporal en las tendencias fenológicas entre ambos periodos de estudio, coincidiendo con el periodo de ralentización del calentamiento global. En el primer periodo, SOS y EOS se adelantaron (-4,7 y -3,3 días, respectivamente), y la duración del ciclo fenológico (LOS) aumentó 1,2 días. Sin embargo, durante la segunda etapa, SOS se retrasó 5,3 días, EOS redujo su adelanto a -0,3 días y LOS disminuyó -6 días. Se observaron dinámicas similares para la influencia de las variables hidroclimáticas en SOS y EOS en el primer periodo, mientras que fueron inexistentes en el segundo. Este estudio proporciona información importante sobre la dinámica fenológica de los cereales de secano, que puede ser útil para su gestión y planificación bajo escenarios de cambio climático.

Palabras-clave: Cereales en secano, NDVI, Humedad del suelo, Calentamiento global.

1. INTRODUCCIÓN

La dinámica fenológica de la vegetación refleja las respuestas estacionales de los ecosistemas a los regímenes climáticos e hidrológicos (Zhang et al., 2023). Por lo tanto, la monitorización de la fenología es fundamental para abordar las variaciones asociadas al cambio climático, especialmente en regiones con restricciones hídricas como la Mediterránea, proyectada como una de las áreas críticas del cambio climático (Peñuelas et al., 2002). Se prevé una reducción de la humedad del suelo (SM), lo que conducirá a una mayor frecuencia e intensidad de sequías agrícolas (Martínez-Fernández et al., 2015), bajo todos los escenarios climáticos, siendo la región mediterránea la más afectada (Almendra-Martín et al., 2022). Esta problemática se agrava aún más en la agricultura de secano, donde la vulnerabilidad frente a la variabilidad ambiental es más acusada. Se trata de un problema importante en España, país eminentemente mediterráneo, donde predomina la agricultura de secano (MAPA, 2023). El sector cerealista es el que tiene mayor base territorial (MAPA, 2023), siendo las principales regiones cerealistas Castilla y León (CL) y Castilla-La Mancha (CM).

La información fenológica del cultivo se obtiene principalmente de registros de campo *in situ* y datos de teledetección. Aunque la monitorización *in situ* proporciona información detallada y precisa, tiene limitaciones por sus escalas espaciales y temporales (Zhan et al., 2024). Los datos satelitales, en cambio, son eficaces para monitorizar la fenología a escalas espaciales y temporales adecuadas (Zhan et al., 2024). La fenología derivada de datos satelitales generalmente se determina a partir de índices de vegetación, como el *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) o el *Enhanced Vegetation Index* (EVI). Numerosos estudios fenológicos han utilizado sensores satelitales, incluidos principalmente el *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR, Zhang et al., 2024) o el *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS, Touhami et al., 2022). En particular, el NDVI derivado del sensor AVHRR ha sido muy utilizado en estudios diversos sobre la dinámica fenológica de la vegetación. Esta serie temporal de NDVI es la más extensa hasta la fecha y ha

demostrado ser efectiva para la monitorización a largo plazo de la vegetación (Zhang et al., 2024).

Los factores climáticos, como la temperatura o precipitación, se han utilizado habitualmente con relación a la fenología, pero otros como el contenido de agua en el suelo, a pesar de su relevancia para los cultivos y los impactos perjudiciales que causa su déficit en el rendimiento (Benito-Verdugo et al., 2023), rara vez se incluyen en estos análisis. Los principales parámetros de vegetación utilizados para monitorizar la dinámica fenológica son el inicio y final del ciclo fenológico (SOS y EOS, respectivamente). Hasta la década de los 2000, se observó un adelanto generalizado de SOS en muchas regiones (Stöckli y Vidale, 2004). Sin embargo, desde el inicio del siglo XXI, esta tendencia ha mostrado signos de desaceleración e incluso inversión (Zhang et al., 2023). Por otro lado, la tendencia general de EOS fue más heterogénea, predominando los adelantos (Zhang et al., 2023). La discrepancia en estas tendencias se ha atribuido al periodo de ralentización del calentamiento global (Piao et al., 2019), pero no está claro si han persistido en los últimos años. Por tanto, Piao et al. (2019) recomiendan continuar la monitorización y análisis utilizando observaciones satelitales, para verificar la evolución de las tendencias fenológicas en las siguientes décadas.

Este estudio tuvo como objetivo analizar los patrones temporales de los parámetros fenológicos de los cereales de secano utilizando datos NDVI AVHRR, así como examinar su relación con variables hidroclimáticas en las dos principales regiones cerealistas de España durante el periodo de 1982 a 2022. Entender la dinámica fenológica de los cereales, especialmente en regiones con limitaciones hídricas, es crucial para su gestión y la predicción de rendimientos bajo escenarios de cambio climático. Los resultados de este estudio pueden proporcionar información útil para la toma de decisiones en la gestión agrícola destinadas a abordar posibles escenarios futuros, especialmente en estas regiones cerealistas, donde enfrentan desafíos hídricos.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Área de estudio

Se seleccionaron las regiones de CL y CM como áreas de estudio, ya que representan aproximadamente el 60% de la producción de cereales en España (MAPA, 2023). Los dos principales cereales son el trigo blando (*Triticum aestivum*) y la cebada (*Hordeum vulgare*), con una producción de trigo blando que alcanza casi el 45% y el 12,7% de la producción nacional en CL y CM, respectivamente. En cuanto a la cebada, CL es la comunidad más productora seguida de CM, representando en conjunto el 57,92% de la producción total. Ambos cultivos en secano tienen una extensión de 1.542.845 ha en CL y 903.902 ha en CM. Estas regiones se caracterizan por tener un clima mediterráneo similar, matizado en un caso y otro por las diferencias latitudinales y altitudinales.

2.2 Materiales

2.2.1. Máscara espacial de cereales en secano

Para delimitar las zonas de cereales en secano, se creó una máscara empleando dos bases de datos. Se utilizó el mapa *Climate Change Initiative Land Cover* (CCI-LC) de la Agencia Espacial Europea (ESA), con una resolución espacial de 300 m (Defourny et al., 2012), para excluir las áreas distintas a cultivos de cereales (diferentes a cultivo de secano y mosaico). Además, para excluir las zonas de regadío (píxeles con más de un 10% de superficie irrigada), se utilizó el *Digital Global Map of Irrigation Areas* de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), con una resolución espacial de 5 minutos de arco (Siebert et al., 2013). Esta máscara se aplicó a todas las bases de datos para seleccionar los píxeles de áreas de cereales de secano, asumiendo que los cereales son el cultivo predominante en cada región.

2.2.2. GIMMS NDVI3g y procesamiento

El conjunto de datos de teledetección utilizado fue el NDVI de tercera generación V1.2 (NDVI3g) del *Global Inventory Modeling and Mapping Studies* (GIMMS). Este conjunto de datos se basa en mediciones corregidas y calibradas del sensor AVHRR, con una resolución espacial de 0,0833 grados y cobertura global (Pinzon et al., 2023), de 1982 a 2022. Proporciona valores de NDVI quincenales. Para obtener series temporales diarias de NDVI, se utilizó el método de interpolación *spline* cúbico. Además, para reducir el ruido, la serie temporal del NDVI se suavizó calculando la media móvil con una ventana de 30 días.

2.2.3. Variables hidroclimáticas

Las variables climáticas se obtuvieron de la base de datos E-OBS versión 28.0, que proporciona datos de Europa desde enero de 1950, con una resolución espacial de $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ y una resolución temporal diaria

(Cornes et al., 2018). Se seleccionaron cuatro variables climáticas: precipitación acumulada (P), temperatura máxima (Tmax), temperatura mínima (Tmin) y humedad relativa (HR). HR se utilizó únicamente para calcular el déficit de presión de vapor (VPD). Se calcularon las medias móviles con una ventana de 30 días para P, Tmax, Tmin y VPD. Finalmente, se promedió cada variable para cada píxel y estación del año, considerando que el otoño abarca de septiembre a noviembre (SON), la primavera de marzo a mayo (MAM) y el verano de junio a agosto (JJA).

La base de datos de reanálisis ERA5-Land, proporcionada por el Centro Europeo de Predicción Meteorológica a Medio Plazo (ECMWF, Muñoz-Sabater et al., 2021), se utilizó para obtener SM. Proporciona datos desde 1981 hasta la actualidad, con una resolución temporal horaria y una malla regular de 0,1°. Además, ofrece datos de SM en tres capas de profundidad en cada píxel, pero en este estudio se promediaron los valores de SM de las 3 capas a las 12 pm y a las 12 am para determinar la SM diaria en la zona radicular (0-100 cm). Al igual que en las variables climáticas, se calcularon las medias móviles de SM con una ventana de 30 días y luego se promediaron para cada estación del año.

2.3. Metodología

2.3.1. Determinación de los parámetros fenológicos

La identificación de los parámetros fenológicos de los cereales se realizó utilizando el método del umbral dinámico modificado (Huang et al., 2019). Este método aborda la asimetría de las series temporales de los índices de vegetación, utilizando dos amplitudes diferentes para determinar SOS y EOS. El año agrícola se definió como el periodo comprendido entre las estaciones en las que ocurren SOS (otoño) y EOS (verano), extendiéndose desde el 1 de septiembre hasta el 31 de agosto del año siguiente (MAPA, 2023). Las fechas de SOS y EOS se obtuvieron a escala de píxel, y los umbrales de amplitud se fijaron en un 20% (Ersi et al., 2023). Se calculó LOS como el tiempo transcurrido entre SOS y EOS, y se identificó la fase de espigado (BS) como el momento en el que el NDVI alcanzó su máximo en el año agrícola. Además, se determinó el valor NDVI en la BS (BV). Por último, siguiendo la metodología de Jeong et al. (2011), se calcularon medias móviles de 10 años para eliminar las incertidumbres estadísticas causadas por los valores atípicos, y los primeros y últimos valores en las series temporales, para cada píxel y parámetro fenológico.

2.3.2. Análisis de tendencias y de correlación

El test estadístico de Mann-Kendall, prueba no paramétrica para la detección de tendencias de series temporales (Kendall, 1948; Mann, 1945), se utilizó para detectar tendencias estadísticamente significativas de aumento o disminución en los parámetros fenológicos a escala de píxel, adoptando un valor de $p \leq 0,05$ como criterio para la significación estadística. Además, se calculó el coeficiente de correlación de Pearson (R) a escala de píxel entre cada variable hidroclimática y SOS y EOS. La significación estadística se evaluó utilizando un valor de $p \leq 0,05$. Previamente, se calcularon las fechas promedio de estos parámetros para todos los píxeles de cada región de estudio, así como para cada estación de las variables hidroclimáticas. Este análisis se llevó a cabo durante la estación en la que ocurrieron SOS y EOS, así como durante la estación anterior (verano y primavera, respectivamente).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Patrones temporales de las tendencias fenológicas

Se observaron cambios significativos de la fenología especialmente después de la década de los 2000, lo que coincide con trabajos previos que han vinculado estos cambios con la desaceleración en el calentamiento global ocurrida a principios del siglo XXI (Piao et al., 2019). Siguiendo la recomendación de Piao et al. (2019), en este estudio se analizaron los patrones de comportamiento antes y después de esta inflexión climática, una metodología empleada en investigaciones previas (Jeong et al., 2011). Para ello, el periodo de estudio se dividió en dos partes: el primer periodo abarcó las dos primeras décadas (1982-2002), y el segundo periodo las últimas dos décadas (2003-2022).

Las tendencias y pendientes de los parámetros fenológicos durante el primer y segundo periodo se muestran en la Tabla 1. Se detectaron cambios significativos entre los dos periodos de estudio, caracterizados por un patrón inverso predominante entre SOS y BS, mientras que EOS experimentó una desaceleración en su avance. Durante el primer periodo, se detectaron adelantos de SOS, EOS y BS en ambas regiones, con más del 66%, 74% y 87% de los píxeles con tendencia negativa, respectivamente. En promedio, aproximadamente el 72% de los píxeles en ambas regiones presentaron tendencias significativas, indicando el adelanto de las fechas de SOS, EOS y BS. El parámetro SOS se adelantó 3,2 días y 6,1 días en CL y CM, respectivamente. EOS

avanzó 6,6 días en CL, mientras que no mostró cambios en CM. La distribución de LOS fue más heterogénea, con una disminución de 3,3 días en CL y un aumento de 5,6 días en CM. Estos resultados están en línea con investigaciones anteriores, como la de Stockli and Vidale (2004), que revelaron un cambio general hacia periodos de crecimiento más tempranos y prolongados en Europa durante el periodo 1982-2001. Sin embargo, algunos estudios también encontraron retrasos en EOS (Reed, 2006). Peñuelas et al. (2002) observaron un adelanto de las fases fenológicas en la región mediterránea de 6 días durante el periodo 1952-2000.

Tabla 1: Tendencias y pendientes de SOS, EOS, LOS, BS y BV a escala de píxel en CL y CM, y medias ponderadas en función de la superficie de cereal de cada una de las regiones, para los dos periodos de estudio. Porcentajes de píxeles con tendencias: positivas (P; en negrita >50%), negativas (N; en negrita >50%), estadísticamente significativas $p < 0,05$ (S), positivas significativas (SP) y negativas significativas (SN). $\Delta\%$ indica el aumento porcentual del NDVI del primer periodo (1P) al segundo periodo (2P).

Regiones	1° Periodo						2° Periodo						
	P	N	S	SP	SN	Pendiente (días/periodo)	P	N	S	SP	SN	Pendiente (días/periodo)	
SOS													
CL	38	62	62	22	40	-3,2	68	32	64	45	19	6,5	
CM	26	73	67	13	54	-6,1	66	33	65	44	21	4,2	
Promedio	34	66	64	19	45	-4,3	67	32	64	45	20	5,7	
EOS													
CL	15	85	70	8	62	-6,6	39	61	59	21	38	-2,0	
CM	45	54	54	25	30	0,0	53	46	62	34	28	1,4	
Promedio	26	74	64	14	50	-4,2	44	55	60	26	34	-0,7	
LOS													
CL	38	61	61	20	41	-3,3	30	70	68	18	50	-8,7	
CM	66	34	55	41	14	5,6	39	60	62	23	39	-3,3	
Promedio	48	51	59	28	31	0,0	33	66	66	20	46	-6,7	
BS													
CL	7	93	80	4	77	-13,0	67	33	73	51	22	4,7	
CM	21	78	65	10	56	-6,9	38	61	82	29	54	-5,0	
Promedio	12	87	74	6	69	-10,7	56	43	76	43	34	1,1	
BV													
	P	N	S	SP	SN	NDVI/ periodo	P	N	S	SP	SN	NDVI/ periodo	$\Delta\%$ 2P-1P
CL	70	30	62	49	13	0,009	79	21	73	62	11	0,015	40
CM	58	42	62	41	21	0,005	84	16	83	73	11	0,018	69
Promedio	66	34	62	46	16	0,008	81	19	77	66	11	0,016	51

Por el contrario, en el segundo periodo, SOS se retrasó, con el 67% de los píxeles con una tendencia positiva, de los cuales más del 67% eran significativos. En CL y CM, se observó un retraso de SOS de 6,5 y 4,2 días, respectivamente. Resultados similares fueron obtenidos por Touhami et al. (2022), quienes detectaron en la región mediterránea un retraso de SOS de 7,8 días de 2000 a 2017. La tendencia de EOS fue menos marcada, aunque en ambas regiones se registró una desaceleración en su avance. BS en CL se invirtió, pasando de adelantarse 13 días en el primer periodo a retrasarse 4,7 días en el segundo periodo. Mientras que, BS en CM experimentó una desaceleración en su adelanto. Se encontraron tendencias de disminución de LOS en ambas regiones, en consonancia con el estudio de Wang et al. (2021). En promedio, LOS presentó tendencia negativa en el 66% de los píxeles, de los cuales casi el 70% fueron significativos, con una disminución de 6,7 días. Además, BV aumentó en ambos periodos, con un incremento promedio del NDVI en el primer periodo de 0,008 y 0,016 en el segundo periodo, siendo este último un 51% superior al del primer periodo. Este resultado está en línea con el de Gao et al. (2022), quienes encontraron una tendencia gradual hacia el reverdecimiento, teniendo un aumento drástico a partir del año 2006 aproximadamente.

3.2. Influencia de las variables hidroclimáticas en los parámetros fenológicos

Durante las dos últimas décadas del s.XX, en CL se observó un patrón marcado de correlaciones inversas estadísticamente significativas entre SOS y EOS, y las variables Tmax, Tmin, VPD del verano y primavera anteriores, respectivamente, así como una correlación directa estadísticamente significativa con SM (Tabla 2). Entre ellas, las relaciones de SOS y EOS con Tmax mostraron valores de R superiores, en torno a -0,66. En CM solo se observaron correlaciones inversas estadísticamente significativas de Tmax y VPD con SOS en el verano anterior (Tabla 2). En relación con ello, varios estudios obtuvieron aumentos significativos de VPD

(Yuan et al., 2019), y de la temperatura (Gao et al., 2022), así como una tendencia decreciente de SM en Europa (Almendra-Martín et al., 2022). Sin embargo, en el presente estudio, durante las dos primeras décadas del s.XXI, no se observaron relaciones significativas en ninguna región. Estas discrepancias entre el primer y el segundo periodo siguen la misma dinámica que los cambios observados en las tendencias de los parámetros fenológicos. Diversos estudios obtuvieron resultados similares, como el caso de Yuan et al. (2019).

Tabla 2. R entre SOS y EOS y las variables hidroclimáticas durante la estación fenológica actual y la estación anterior en CL y CM, considerando el primer (1P) y el segundo (2P) periodos. $p < 0,05$ indica significación estadística (*).

Variables	SOS (%)				EOS (%)			
	Otoño		Verano anterior		Verano		Primavera	
	1P	2P	1P	2P	1P	2P	1P	2P
CL								
P	0,08	-0,16	0,28	0,20	-0,05	0,01	0,04	0,01
Tmax	0,31	0,23	-0,66*	0,11	-0,24	-0,33	-0,65*	-0,14
Tmin	0,15	0,14	-0,61*	0,14	-0,37	-0,32	-0,56*	-0,32
VPD	0,32	0,16	-0,57*	0,18	-0,21	-0,36	-0,50*	-0,08
SM	-0,12	-0,07	0,53*	0,11	0,28	0,02	0,55*	-0,06
CM								
P	-0,05	-0,08	0,3	0,07	-0,34	-0,03	0,26	-0,12
Tmax	0,15	0,06	-0,29	0,21	-0,05	0,12	-0,27	0,14
Tmin	-0,13	0,09	-0,57*	0,35	-0,11	0,24	0,07	-0,03
VPD	-0,09	0,05	-0,5*	0,36	0,15	0,27	-0,26	0,22
SM	-0,13	0,03	0,33	-0,03	0,01	-0,15	0,26	-0,15

4. CONCLUSIONES

Los resultados revelan una clara diferencia de las tendencias fenológicas de los cereales entre las últimas décadas del siglo XX y las primeras del siglo XXI. Durante el primer periodo, predominó el adelanto de SOS, EOS y BS, junto con un aumento de LOS. Por el contrario, el segundo periodo presentó cambios significativos, con retrasos de SOS, aumentos de LOS y retraso o desaceleración en el adelanto de EOS y BS. Además, se observó una mayor influencia de las variables energéticas y SM en la estación previa a SOS y EOS durante el primer periodo, aunque estas variables no mostraron relaciones significativas durante el segundo periodo. Estos hallazgos podrían atribuirse a la desaceleración del calentamiento global a principios del s.XXI, reflejando posibles cambios en las tendencias fenológicas. Los cambios fenológicos identificados son de importancia crítica, ya que podrían tener repercusiones significativas en la seguridad alimentaria, especialmente en regiones susceptibles de sufrir escasez de SM debido al cambio climático. En estos entornos, la gestión y la predicción de rendimientos son cruciales para garantizar la sostenibilidad agrícola bajo escenarios de cambio climático. Este estudio puede ayudar a informar las decisiones de gestión destinadas a abordar situaciones futuras en regiones con escasez de agua. Además, subraya la importancia de estudiar las tendencias fenológicas y su relación con el cambio climático para desarrollar estrategias de adaptación efectivas, como la planificación de la siembra y manejo de cultivos, así como para fortalecer los sistemas agrícolas ante condiciones ambientales cambiantes, proporcionando una base sólida para investigaciones futuras.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio fue financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades MCIN/AEI/10.13039/501100011033/ (proyecto PID2020- 114623RB-C33), y la Junta de Castilla y León (proyectos SA112P20, CLU-2018-04) y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER). La investigación de Pilar Benito-Verdugo ha sido financiada por una beca predoctoral (FPU20/00592) del Ministerio de Universidades para la Formación de Profesorado Universitario (FPU).

5. BIBLIOGRAFÍA

Almendra-Martín, L., Martínez-Fernández, J., Piles, M., González-Zamora, Á., Benito-Verdugo, P., y Gaona, J. (2022). Analysis of soil moisture trends in Europe using rank-based and empirical decomposition approaches. *Global and Planetary Change*, 215, 103868. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2022.103868>

- Benito-Verdugo, P., Martínez-Fernández, J., González-Zamora, Á., Almendra-Martín, L., Gaona, J., y Herrero-Jiménez, C. M. (2023). Impact of Agricultural Drought on Barley and Wheat Yield: A Comparative Case Study of Spain and Germany. *Agriculture*, 13(11), 2111. <https://doi.org/10.3390/agriculture13112111>
- Cornes, R. C., van der Schrier, G., van den Besselaar, E. J., y Jones, P. D. (2018). An ensemble version of the E-OBS temperature and precipitation data sets. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123(17), 9391-9409.
- Defourny, P., Kirches, G., Brockmann, C., Boettcher, M., Peters, M., Bontemps, S., Lamarche, C., Schlerf, M. y Santoro, M. (2012). *Land Cover CCI: Product User Guide Version 2*; ESA: Louvain-la-Neuve, Belgium.
- Ersi, C., Bayaer, T., Bao, Y., Bao, Y., Yong, M., Lai, Q., Zhang, X., y Zhang, Y. (2023). Comparison of Phenological Parameters Extracted from SIF, NDVI and NIRv Data on the Mongolian Plateau. *Remote Sensing*, 15(1), 187.
- Gao, W., Zheng, C., Liu, X., Lu, Y., Chen, Y., Wei, Y., y Ma, Y. (2022). NDVI-based vegetation dynamics and their responses to climate change and human activities from 1982 to 2020: A case study in the Mu Us Sandy Land, China. *Ecological Indicators*, 137, 108745. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108745>
- Huang, X., Liu, J., Zhu, W., Atzberger, C., y Liu, Q. (2019). The optimal threshold and vegetation index time series for retrieving crop phenology based on a modified dynamic threshold method. *Remote Sensing*, 11(23), 2725. <https://doi.org/10.3390/rs11232725>
- Jeong, S.-J., HO, C.-H., GIM, H.-J., y Brown, M. E. (2011). Phenology shifts at start vs. End of growing season in temperate vegetation over the Northern Hemisphere for the period 1982–2008. *Global Change Biology*, 17(7), 2385-2399. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02397.x>
- Kendall, M. G. (1948). *Rank correlation methods*. Griffin, London, UK.
- Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, 13(3), 245-259.
- MAPA. (2023). *Anuario de estadística*. Ministerio de agricultura Pesca y Alimentación. Madrid, Spain.
- Martínez-Fernández, J., González-Zamora, A., Sánchez, N., y Gumuzzio, A. (2015). A soil water based index as a suitable agricultural drought indicator. *Journal of Hydrology*, 522, 265-273. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.12.051>
- Muñoz-Sabater, J., Dutra, E., Agustí-Panareda, A., Albergel, C., Arduini, G., Balsamo, G., Boussetta, S., Choulga, M., Harrigan, S., Hersbach, H., Martens, B., Miralles, D. G., Piles, M., Rodríguez-Fernández, N. J., Zsoter, E., Buontempo, C., y Thépaut, J.-N. (2021). ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth System Science Data*, 13(9), 4349-4383.
- Peñuelas, J., Filella, I., y Comas, P. (2002). Changed plant and animal life cycles from 1952 to 2000 in the Mediterranean region. *Global Change Biology*, 8(6), 531-544.
- Piao, S., Liu, Q., Chen, A., Janssens, I. A., Fu, Y., Dai, J., Liu, L., Lian, X., Shen, M., y Zhu, X. (2019). Plant phenology and global climate change: Current progresses and challenges. *Global Change Biology*, 25(6), 1922-1940.
- Pinzon, J.E., Pak, E.W., Tucker, C.J., Bhatt, U.S., Frost, G.V., y Macander, M.J. (2023). *Global Vegetation Greenness (NDVI) from AVHRR GIMMS-3G+, 1981-2022*. ORNL DAAC, Oak Ridge, Tennessee, USA.
- Reed, B. C. (2006). Trend Analysis of Time-Series Phenology of North America Derived from Satellite Data. *GIScience & Remote Sensing*, 43(1), 24-38. <https://doi.org/10.2747/1548-1603.43.1.24>
- Siebert, S., Henrich, V., Frenken, K., y Burke, J. (2013). *Update of the Digital Global Map of Irrigation Areas to Version 5*. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome, Italy.
- Stöckli, R., y Vidale, P. L. (2004). European plant phenology and climate as seen in a 20-year AVHRR land-surface parameter dataset. *International Journal of Remote Sensing*, 25(17), 3303-3330.
- Touhami, I., Moutahir, H., Assoul, D., Bergaoui, K., Aouinti, H., Bellot, J., y Andreu, J. M. (2022). Multi-year monitoring land surface phenology in relation to climatic variables using MODIS-NDVI time-series in Mediterranean forest, Northeast Tunisia. *Acta Oecologica*, 114, 103804.
- Wang, J., Sun, H., Xiong, J., He, D., Cheng, W., Ye, C., Yong, Z., y Huang, X. (2021). Dynamics and Drivers of Vegetation Phenology in Three-River Headwaters Region Based on the Google Earth Engine. *Remote Sensing*, 13(13), 2528. <https://doi.org/10.3390/rs13132528>
- Yuan, M., Wang, L., Lin, A., Liu, Z., y Qu, S. (2019). Variations in land surface phenology and their response to climate change in Yangtze River basin during 1982–2015. *Theoretical Applied Climatology*, 137, 1659-1674.
- Zhan, W., Luo, F., Luo, H., Li, J., Wu, Y., Yin, Z., Wu, Y., y Wu, P. (2024). Time-Series-Based Spatiotemporal Fusion Network for Improving Crop Type Mapping. *Remote Sensing*, 16(2), 235. <https://doi.org/10.3390/rs16020235>
- Zhang, H., Li, L., Zhao, X., Chen, F., Wei, J., Feng, Z., Hou, T., Chen, Y., Yue, W., Shang, H., Wang, S., y Hu, M. (2024). Changes in Vegetation NDVI and Its Response to Climate Change and Human Activities in the Fergana Basin from 1982 to 2015. *Remote Sensing*, 16(7), 1296. <https://doi.org/10.3390/rs16071296>

Zhang, R., Zhou, Y., Hu, T., Sun, W., Zhang, S., Wu, J., y Wang, H. (2023). Detecting the Spatiotemporal Variation of Vegetation Phenology in Northeastern China Based on MODIS NDVI and Solar-Induced Chlorophyll Fluorescence Dataset. *Sustainability*, 15(7), 6012. <https://doi.org/10.3390/su15076012>

Impacto y recuperación de la vida nocturna durante la pandemia de COVID-19: Análisis comparativo entre Madrid y Kioto a través de datos de telefonía

E. Santiago-Iglesias¹, G. Romanillos¹, W. Sun², J.D. Schmöcker², B. Moya-Gómez¹, J.C. García-Palomares¹

¹: Departamento de Geografía, Grupo de investigación tGIS, Universidad Complutense de Madrid, Madrid, 28040, Spain

²: Dept. of Urban Management, Graduate School of Engineering, Kyoto University, Kyoto, 615-8540, Japan.

ensantia@ucm.es, <https://orcid.org/0000-0001-5489-3877>

gustavro@ucm.es, <https://orcid.org/0000-0001-5098-8596>

wz.sun@trans.kuciv.kyoto-u.ac.jp, <https://orcid.org/0000-0002-7305-8671>

schmoecker.jandirk.5m@kyoto-u.ac.jp, <https://orcid.org/0000-0003-2219-9447>

bmoyagomez@ucm.es, <https://orcid.org/0000-0002-0520-039X>

jcgarcia@qhis.ucm.es, <https://orcid.org/0000-0002-8759-6809>

RESUMEN: La vida nocturna juega un rol importante en las ciudades, sustentada en interacciones sociales que construyen comunidad e impulsan la economía. El impacto de la pandemia de COVID-19 en la vida nocturna, severo y de larga duración, ha sido poco estudiado desde una perspectiva espacial, y aún menos desde una perspectiva temporal, relativa a los ritmos de recuperación. Este estudio analiza el impacto y la recuperación de la vida nocturna a través de la presencia de ciudadanos, estimada en base a datos de telefonía móvil en Kioto (Japón) y Madrid (España). Dos ciudades con culturas y políticas contra el COVID-19 muy diferentes. La ciudad de Kioto, con una gran dependencia del turismo, tuvo un impacto más severo y pronunciado, experimentando un decrecimiento en la presencia de población del 51.93% en las zonas más turísticas durante el COVID-19, y del 19,75% en el periodo de nueva normalidad. Por el contrario, en Madrid se descubre un cambio en las dinámicas urbanas después de la pandemia, aumentando el uso de diferentes áreas de la ciudad, como las zonas de mayor actividad durante los fines de semana, que tuvieron un aumento de presencia de población del 15,54% los días de entre semana (de lunes a jueves).

Palabras-clave: Vida nocturna, resiliencia, datos de telefonía, clúster espaciotemporal.

1. INTRODUCCIÓN

La vida nocturna juega un rol muy importante en las ciudades, enriqueciendo las interacciones sociales, promoviendo actividades culturales y dinamizando la economía. De hecho, constituye un pilar fundamental en el desarrollo económica de las ciudades, generando un empleo importante a través de las distintas actividades nocturnas. Además, una ciudad con un gran ambiente nocturno es un imán para el turismo, tanto local como extranjero. Si una ciudad ofrece una experiencia cultural y de entretenimiento nocturno, los turistas estarán más dispuestos a pernoctar en la ciudad para experimentarla.

El término “Night-Time Economy (NTE)” emerge en la literatura a principio de los años 90. Los centros de las ciudades siempre han tenido un ambiente nocturno, pero con la desindustrialización, los centros urbanos tuvieron un declive en el uso nocturno pasando su uso a las horas del día. Este hecho, da paso a la primera ola de las tres olas que define Hadfield (2015) en la NTE. La primera ola se centra en la revitalización cultural del centro de las ciudades con el fin de evitar el llamado “5pm Flight”, que significa el éxodo de la población de las zonas de trabajo a las zonas residenciales y empezar a revitalizar la economía nocturna (Bianchini, 1995; Uk, 1991). La segunda ola trajo consigo repercusiones en temas de seguridad, actividades ilícitas y consumo de estupefacientes (Roberts, 2006; Shaw, 2014). La tercera ola se centra en cómo áreas

urbanas específicas se esfuerzan por atraer a un público distinto, más inclinado hacia las actividades culturales y menos obsesionado con el consumo de alcohol. Esta tercera ola enfatiza la comprensión de quién se beneficia y quién se ve afectado por las decisiones y políticas que moldean la vida nocturna urbana.

Aunque la vida nocturna es un aspecto crucial de las ciudades, sólo empieza a ganar interés en los últimos años. Normalmente, los estudios urbanos se centran más en las actividades diurnas, pasando por alto lo que ocurre en la tarde/noche. El concepto NTE ha ganado popularidad recientemente, y los estudios sobre la vida nocturna han ido aumentando (Lin et al., 2022; McArthur et al., 2019). Sin embargo, la principal dificultad para realizar un análisis cuantitativo de la vida nocturna ha sido la falta de datos con una alta granularidad espacial. Gracias a la transformación tecnológica en las áreas urbanas, con la implementación de sensores que recopilan grandes volúmenes de datos georreferenciados, se puede abordar este tema desde una perspectiva espacial y cuantitativa.

Efectivamente, el Big Data es clave en la investigación, aportando un entendimiento más profundo de las dinámicas urbanas a través de la geolocalización. Con estas nuevas fuentes de datos han surgido muchos estudios que abordan el impacto del COVID-19 en las dinámicas urbanas, por ejemplo, a través de datos de redes sociales o telefonía (Romanillos et al., 2021; Serrano-Estrada et al., 2022), pero lo hacen desde una perspectiva más general sin centrar su foco en la vida nocturna. Esta literatura identifica 4 factores de influencia en el impacto del COVID-19: teletrabajo, el miedo a la infección, la búsqueda de un estilo de vida más saludable y el cambio en el propósito de los viajes. Estos factores han incentivado el aumento en el cambio de residencia, dando como resultado un incremento en la migración de las grandes ciudades a zonas más rurales (González-Leonardo et al., 2022). Se han realizado varias encuestas para poder estudiar los cambios en las dinámicas urbanas, para el caso de Madrid, Al-Akioui & Monzón (2023) analizaron los resultados de una encuesta sobre estos cambios, encontrando que el 25% de los encuestados había cambiado su modo de transporte, el mayor perjudicado es el transporte público con un descenso en uso del 6%, mientras que caminar e ir en bici aumentaba un 4%.

Con el inicio de la pandemia, la economía nocturna fue uno de los sectores más afectados. Las restricciones en el entretenimiento nocturno y en la movilidad fueron un duro golpe para la vida nocturna de las ciudades. Algunos estudios analizan la vida nocturna durante el COVID-19 (Cunillera Puértolas et al., 2022; Mazierska & Rigg, 2021), aunque, hasta donde nosotros sabemos, no hay estudios que hayan examinado como la pandemia afectó a la vida nocturna desde una perspectiva cuantitativa, considerando además la variable espacial. Este estudio aborda este hueco en la literatura, tomando como casos de estudio las ciudades de Kioto (Japón) y Madrid (España). En estas dos ciudades, culturalmente muy diferentes, se tomaron distintas políticas frente a la pandemia, lo que hace que la comparación sea de gran interés. Para llevarla a cabo, se han analizado datos de telefonía móvil, con una resolución espacial que ha permitido estudiar el efecto de la pandemia en la vida nocturna en distintas áreas de ambas ciudades, en distintos periodos de tiempo. Así, este estudio intenta dar respuesta a las siguientes preguntas de investigación: ¿Las dinámicas urbanas de la vida nocturna se han recuperado del todo o se han visto alteradas? ¿Las zonas de ocio nocturno han cambiado? ¿El impacto y recuperación en ambas ciudades es parecido, aunque se hayan tomado políticas contra el COVID-19 distintas?

2. DATOS Y CASO DE ESTUDIO

2.1. Zonas de estudio

Los centros urbanos de las ciudades de Kioto y Madrid son objeto de nuestro análisis. El área urbana de la ciudad de Madrid tiene una población media de 3.316.000 personas, donde el 2,1% son no residentes. En el caso de Kioto, la población media en el área urbana es de 1.394.000, con un 8,81% de personas no residentes. El turismo es un factor importante en ambas ciudades. Especialmente en Kioto, donde representa más del 14% del PIB⁸, mientras que para Madrid supone un 6,1% del PIB⁹.

Para una comparación más precisa, los datos de telefonía han sido agregados en mallas de 500mx500m

⁸ Kyoto City Tourism Association (n.d.) <https://www.kyokanko.or.jp/about-cta/> (In Japanese), accessed on May 27, 2024

⁹ https://www.madrid.org/iestadis/fijas/estructu/economicas/otros/cst_ana.htm (In Spanish), accessed on May 27, 2024

que recogen toda la zona urbana de ambas ciudades (Fig.1).

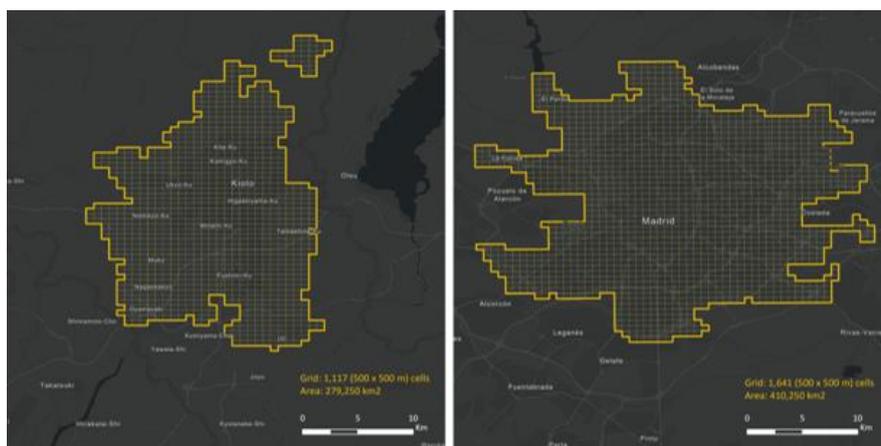


Figura 1. Rejilla del área urbana para Kioto (izquierda) y Madrid (derecha). Fuente: Elaboración propia.

2.2. Zonas de estudio

Los datos proceden de empresas líder en el sector de las telecomunicaciones. En el caso de Madrid de la empresa Nommon Solutions and Technology, que trabaja con uno de los tres principales operadores de telefonía de España (cuota de mercado superior al 20%). En el caso de Kioto, los datos son proporcionados por NTT DOCOMO, que también es uno de los principales operadores de telefonía de Japón. Los datos contienen las posiciones geolocalizadas de los dispositivos móviles a nivel de antena, tanto para eventos activos (llamadas, SMS, conexiones a Internet) como para determinados eventos pasivos (cambios de área de cobertura, actualizaciones de la red, etc.). Con estos datos, se realiza una elevación de la muestra, tanto para residentes en España, como para no residentes.

Los datos contienen la presencia de personas para cada hora, en las zonas delimitadas por cada compañía. En ambos casos se han agrupado a las mallas descritas en el apartado anterior. Para ambas ciudades se han tomado tres periodos: Pre-COVID-19, COVID-19 y Post-COVID-19. Para el periodo Pre-COVID-19 se ha tomado la fecha disponible más cercana anterior al inicio de la pandemia, para el periodo COVID, se ha tomado la fecha disponible más cercana después del inicio de la pandemia, y para el periodo Post-COVID-19, se ha tomado la fecha más reciente disponible (Fig. 2).

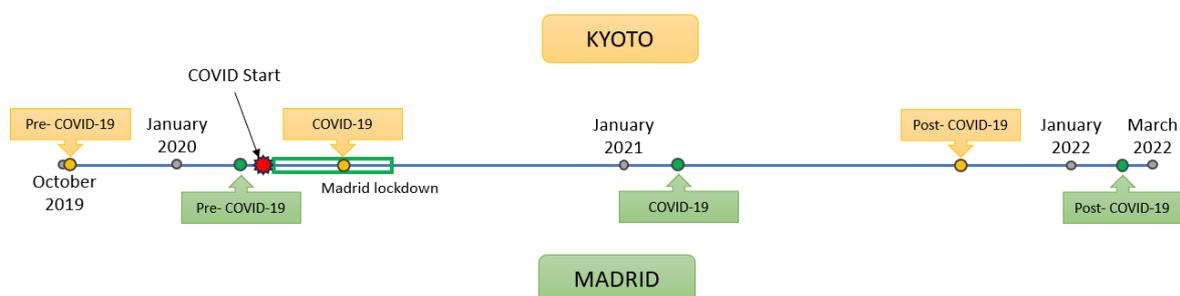


Figura 2. Línea temporal de los periodos de estudio para ambas ciudades. Fuente: Elaboración propia.

3. METODOLOGÍA

3.1. Clúster espacio-temporal.

Para analizar el impacto de la COVID-19 en la vida nocturna de las dos ciudades partimos de una clasificación de las zonas urbanas en zonas de actividad. Esta clasificación se ha realizado a partir de un clúster espacio-temporal para las celdas de las mallas de ambas ciudades, teniendo en cuenta la variación de presencia de gente a lo largo de toda la semana en el periodo Pre COVID-19. El principal objetivo es agrupar las celdas en grupos que tengan un comportamiento parecido a lo largo de toda la semana. Para medir las similitudes en la variación de presencia de gente, se ha utilizado la distancia euclídea entre los valores de las

series temporales de cada celda, fórmula (1), donde C1 y C2 son las series temporales de variación de presencia de la celda1 y la celda2 respectivamente ($C1_{Lunes-00:00}$, $C1_{Lunes-01:00}$, ..., $C1_{Dom-22:00}$, $C1_{Dom-23:00}$).

$$\left(\sum_{t=Mo\ 00:00}^{Sun\ 23:00} (C1_t - C2_t)^2 \right)^{1/2} \quad (1)$$

El número de clústeres es seleccionado usando el pseudo estadístico F de Calinski-Harabasz. En este caso, el número de grupos resultantes han sido 4, nombrados de la siguiente manera: (1) "Zonas Residenciales", ganan presencia de gente durante las horas nocturnas, y durante las horas laborales baja la presencia. (2) "Zonas laborales", ganan presencia los días laborales durante la jornada laboral, se trata sobre todo de zonas de oficinas y universidades. En este grupo hay 3 diferentes intensidades, baja, media y alta. (3) "Zonas de Ocio", ganan presencia los fines de semanas, se corresponden con parques, zonas turísticas y centro de las ciudades. (4) "Zonas neutrales", no hay apenas variación en estas zonas (Fig. 3).

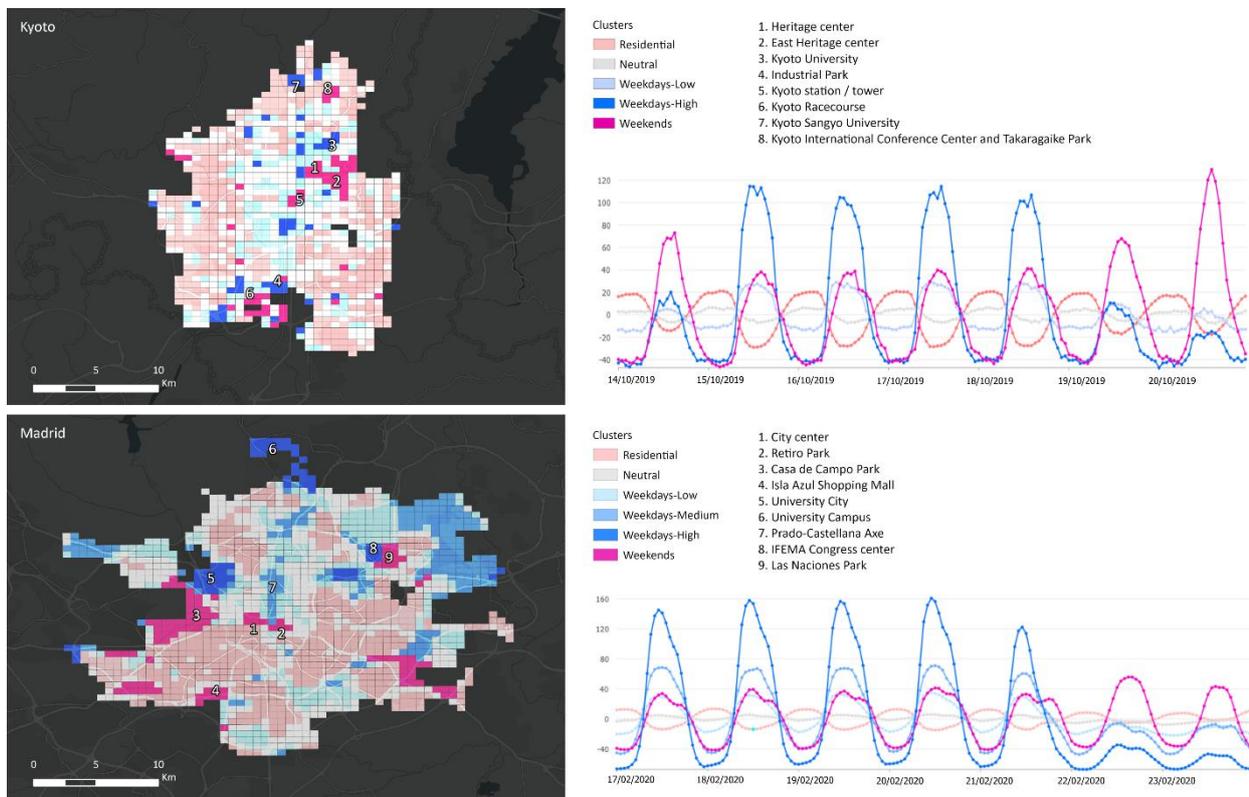


Figura 3. Clústeres espaciotemporales para Kioto y Madrid. Fuente: Elaboración propia.

3.2. Análisis del impacto del COVID-19

Para analizar el impacto de la pandemia y la resiliencia en la vida nocturna de ambas ciudades, se ha tomado el periodo temporal de 17:00 a 00:00, teniendo en cuenta el horario habitual de salida del trabajo, y consideramos vida nocturna, a las actividades que se realizan durante este intervalo temporal. Tomando como referencia los clústeres calculados en el apartado anterior, se define el siguiente indicador para medir el impacto o recuperación en cada uno de los grupos anteriores, para ello se calcula la ratio entre las áreas de las curvas de la semana de estudio y la semana de referencia (2):

$$A_{SE} / A_{SR} \quad (2)$$

Donde A_{SE} es la semana de estudio, pudiendo ser el periodo COVID-19 para medir el impacto de la pandemia, o el periodo Post-COVID-19 para medir la recuperación, y A_{SR} es la semana de referencia, en este caso es la semana Pre-COVID-19.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La tabla 1 muestra los valores del indicador para medir el impacto y la tabla 2 muestra los valores del indicador para medir la recuperación. Para Kioto, el clúster residencial muestra un impacto muy positivo, es decir, la presencia de gente aumenta durante la noche, con valores del indicador alcanzando 1.11, para la recuperación los valores vuelven a los previos de la pandemia, rondando el valor 1. Comparándolo con Madrid, la presencia decrece en estas zonas, tanto como para los valores del impacto y siendo más pronunciado para el indicador de recuperación. Esto puede ser debido al éxodo de las zonas urbanas hacia zonas rurales (González-Leonardo et al., 2022), y también se puede tomar en consideración el hecho de que, tras el confinamiento, la percepción al riesgo de la pandemia decreció, cambiando la actitud de los residentes (Wu et al., 2022). En cambio, para Kioto, sin tener un confinamiento estricto, la alta presión social que ejerció el gobierno para evitar zonas de concentración de personas con el fin de disminuir el riesgo de contagio influyó negativamente en la movilidad.

Para el clúster de días laborales, se aprecia el impacto que tuvo la pandemia en la presencia de gente en estas zonas, en Kioto con valores mucho más bajos que para Madrid, pero es debido principalmente a la disponibilidad de fechas, que el periodo COVID-19 para Kioto está mucho más cercano al inicio de la pandemia que para Madrid. También la causa fundamental es el incremento del teletrabajo (Al-Akioui & Monzón, 2023). Lo más llamativo de los resultados para este grupo en Madrid, son los valores tan elevados del indicador los domingos, tanto para la tabla 1 como para la tabla 2. Estas zonas corresponden con universidades y zonas de negocios, muchas de ellas tienen amplias zonas verdes, y están situadas fuera de las aglomeraciones del centro de la ciudad y no son sitios muy turísticos, lo que favorece el poder disfrutar de estas zonas, con riesgo de contagio bajo, ya que la utilización de parques se incrementó después de la pandemia (Wu et al., 2022).

1.1 **Tabla 1.** Indicador del impacto (COVID-19 / Pre-COVID-19)

Día de la semana	Clúster Residencial		Clúster Días laborales		Clúster Fin de semana		Clúster Neutral	
	Kioto	Madrid	Kioto	Madrid	Kioto	Madrid	Kioto	Madrid
Lunes	1.05	0.96	0.88	0.88	0.51	0.98	1.01	1.01
Martes	1.10	0.97	0.67	0.83	0.50	0.93	1.01	1.01
Miércoles	1.11	0.97	0.67	0.81	0.48	0.92	1.01	1.00
Jueves	1.10	0.97	0.67	0.82	0.49	0.93	1.01	1.00
Viernes	1.11	0.97	0.68	0.96	0.45	0.83	1.01	0.99
Sábado	1.11	0.98	0.74	0.99	0.39	0.77	1.01	1.01
Domingo	1.08	0.95	0.78	1.33	0.41	0.97	1.00	1.03

1.2 **Tabla 2.** Indicador de la recuperación (Post-COVID-19 / Pre-COVID-19)

Día de la semana	Clúster Residencial		Clúster Días laborales		Clúster Fin de semana		Clúster Neutral	
	Kioto	Madrid	Kioto	Madrid	Kioto	Madrid	Kioto	Madrid
Lunes	0.99	0.94	1.12	1.03	0.8	1.22	1.02	1.02
Martes	1.04	0.95	0.89	0.98	0.51	1.12	1.02	1.02
Miércoles	1.04	0.95	0.88	0.97	0.79	1.09	1.02	1.01
Jueves	1.04	0.95	0.89	0.97	0.82	1.10	1.02	1.02
Viernes	1.03	0.95	0.93	1.15	0.83	1.03	1.02	1.01
Sábado	1.02	0.95	0.94	1.05	0.85	0.99	1.01	1.02
Domingo	1.02	0.94	0.93	1.53	0.76	1.14	1.01	1.03

Para el clúster de fin de semana, que se corresponde con las zonas más turísticas de ambas ciudades, se puede apreciar un gran impacto (Tabla 1). En el caso de Kioto es mucho más severo, llegando a tener un valor del indicador de 0.39. Kioto es una ciudad mucho más dependiente del turismo que la ciudad de Madrid, por lo que se puede apreciar el impacto brutal que sufrió la ciudad al restringir por completo la actividad del turismo. En Madrid el impacto es menor, los días que más presencia de gente pierde es el viernes y el sábado, con un valor del indicador de 0.83 y 0.77 respectivamente, el resto de los días de la semana no tienen un

impacto tan alto. La tabla 2 muestra que Kioto recupera presencia de gente comparado con el periodo COVID-19, pero no llega a los valores de presencia de antes de la pandemia. En el caso de Madrid, los valores de la tabla 2 llaman mucho la atención, los viernes y sábado vuelven a tener la misma presencia que antes de la pandemia, pero el resto de los días de la semana estas zonas están atrayendo mucha más presencia, se puede asociar a los factores de influencia en la movilidad del COVID-19, en concreto a la búsqueda de un estilo de vida más saludable. Este grupo contiene los 3 parques más famosos de Madrid ("El Retiro", "Juan Carlos I", and "Casa de Campo"), estas zonas se incluyeron dentro del clúster fin de semana, debido a su perfil temporal de alta presencia de gente durante los fines de semana, pero la dinámica de uso de estas zonas ha cambiado completamente después de la pandemia, aumentando el uso al resto de días de la semana.

5. CONCLUSIONES Y LIMITACIONES

La exploración de los datos de telefonía ha conducido a resultados muy interesantes. Los análisis muestran la relación entre las dinámicas urbanas después de la pandemia y las restricciones tomadas por ambos gobiernos — España impuso un confinamiento estricto muy prolongado mientras que Japón no impuso ningún confinamiento, siendo los medios los que insistieron en la importancia de evitar contagios —. El resultado más relevante es el cambio en el uso de zonas dentro de la ciudad de Madrid. En estas áreas, durante la pandemia del COVID-19, los espacios de ocio nocturno experimentaron una transformación significativa, volviendo a una importante actividad tras la pandemia, con un cambio destacado: su uso se extendió durante toda la semana en lugar de concentrarse especialmente en el fin de semana. Además, las zonas de ocio que se utilizaron durante el COVID-19 continuaron siendo frecuentadas, evidenciando un cambio duradero en los patrones de comportamiento urbano.

Una de las principales limitaciones en este estudio es la disponibilidad de los datos. En el caso de Kioto, no se disponía de datos en fechas más recientes, no pudiendo analizar un periodo de tiempo más actual de la ciudad. Por otro lado, no se disponía de datos para Madrid más cercanos al inicio de la pandemia, utilizándose por ello la fecha más cercana, no reflejándose así el severo impacto que hubo a mediados de 2020.

AGRADECIMIENTOS

Esta comunicación es parte de los proyectos NEWGEOMOB (PID2020-116656RB-I00) and DARUMA (PCI2020-120706-2) financiados por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por "European Union NextGenerationEU/PRTR". Esta comunicación también ha sido financiada por EIG CONCERT-Japan, proyecto DARUMA, referencia JPMJSC20C4 y financiado por JST SICORP, Japan.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Al-Akioui, A., & Monzon, A. (2023). Spatial Analysis of COVID-19 Pandemic Impacts on Mobility in Madrid Region. *Sustainability (Switzerland)*, 15(19). <https://doi.org/10.3390/su151914259>
- Bianchini, F. (1995). Night Cultures, Night Economies. *Planning Practice & Research*, 10(2), 121–126. <https://doi.org/10.1080/02697459550036667>
- Cunillera Puértolas, O., Contreras-Martos, S., Marzo-Castillejo, M., López Gallegos, D., Acedo Anta, M., Almeda Ortega, J., Colom, J., Basora, J., & Salvador-Gonzalez, B. (2022). Evaluating the controlled reopening of nightlife during the COVID-19 pandemic: a matched cohort study in Sitges, Spain, in May 2021 (Reobrim Sitges). *BMJ Open*, 12(6). <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2021-058595>
- González-Leonardo, M., López-Gay, A., Newsham, N., Recaño, J., & Rowe, F. (2022). Understanding patterns of internal migration during the COVID-19 pandemic in Spain. *Population, Space and Place*, 28(6). <https://doi.org/10.1002/psp.2578>
- Hadfield, P. (2015). The night-time city. Four modes of exclusion: Reflections on the Urban Studies special collection. *Urban Studies*, 52(3), 606–616. <https://doi.org/10.1177/0042098014552934>
- Lin, V. S., Qin, Y., Ying, T., Shen, S., & Lyu, G. (2022). Night-time economy vitality index: Framework and evidence. *Tourism Economics*, 28(3), 665–691. <https://doi.org/10.1177/13548166211042970>
- Mazierska, E., & Rigg, T. (2021). *View of Challenges to British Nightclubs During and After the Covid-19 Pandemic*. <https://doi.org/https://dx.doi.org/10.12801/1947-5403.2021.13.01.05>

- McArthur, J., Robin, E., & Smeds, E. (2019). Socio-spatial and temporal dimensions of transport equity for London's night time economy. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 121, 433–443. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2019.01.024>
- Roberts, M. (2006). From “creative city” to “no-go areas” - The expansion of the night-time economy in British town and city centres. *Cities*, 23(5), 331–338. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2006.05.001>
- Romanillos, G., García-Palomares, J. C., Moya-Gómez, B., Gutiérrez, J., Torres, J., López, M., Cantú-Ros, O. G., & Herranz, R. (2021). The city turned off: Urban dynamics during the COVID-19 pandemic based on mobile phone data. *Applied Geography*, 134. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2021.102524>
- Serrano-Estrada, L., Ciriquián, P. M., Bernabeu-Bautista, Á., & Ruiz-Santacruz, J. S. (2022). The urban impact of COVID-19: six neighbourhoods, three cities and three countries in social network data. *VLC Arquitectura*, 9(2), 301–332. <https://doi.org/10.4995/vlc.2022.17762>
- Shaw, R. (2014). Beyond night-time economy: Affective atmospheres of the urban night. *Geoforum*, 51, 87–95. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2013.10.005>
- Uk, C. (1991). *Out of hours: a study of economic, social and cultural life in twelve town centres in the UK - summary report*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:151500544>
- Wu, S., Grant-Muller, S., & Yang, L. (2022). Modelling the Mobility Changes Caused by Perceived Risk and Policy Efficiency. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 11(8). <https://doi.org/10.3390/ijgi11080453>

Exposición a Espacios Verdes y Riesgo de Sobrepeso y Obesidad infantil Antes y Durante la Pandemia

A. Colom Fernández ^{1,2}, M. Ruiz-Pérez ^{1,2,3}, J de Bont ⁴

¹ Geography Department, University of the Balearic Islands, 07589 Balears, Spain.

² Health Research Institute of the Balearic Islands (IdISBa), 07122 Palma, Spain.

³ GIS and Remote Sensing Service, University of the Balearic Islands, 07589 Balears, Spain

⁴ Institute of Environmental Medicine, Karolinska Institutet

a.colom@uib.es, <https://orcid.org/0000-0001-5041-0778>

maurici.ruiz@uib.es, <https://orcid.org/0000-0002-5440-214X>

bont@ki.se, <https://orcid.org/0000-0002-7746-5020>

RESUMEN: Durante la pandemia de COVID-19, los niños y adolescentes vieron reducidas las oportunidades de actividad física y aumentaron la actividad sedentaria. En este contexto, la exposición a áreas verdes y el riesgo de obesidad podrían variar en función del contexto socioeconómico, reflejando cómo los determinantes sociales de la salud influyen en los beneficios asociados al acceso a espacios verdes. Este estudio examina las asociaciones entre los espacios verdes con cambios en la obesidad pediátrica antes y durante la pandemia.

Nuestros resultados indican una asociación potencialmente protectora entre mayor exposición a espacios verdes y menor riesgo de obesidad infantil. Sin embargo, esta relación no parece haber cambiado significativamente durante la pandemia en comparación con el periodo pre-pandémico. Estos resultados subrayan la importancia de los espacios verdes para la salud pública, aunque se necesitan más investigaciones para comprender completamente estas dinámicas.

Palabras-clave: Geografía de la Salud, Geografía Médica, Disease Mapping, Obesidad Pediátrica, Baleares.

1. INTRODUCCIÓN

La obesidad pediátrica es una preocupación global de salud pública (Malecka-Tendera & Mazur, 2006), con una prevalencia particularmente alta en países mediterráneos como España (Bravo-Saquicela, Sabag, Rezende, & Rey-Lopez, 2022; De Bont et al., 2020; World Health Organization, 2021). En las Islas Baleares, la prevalencia de obesidad infantil aumentó del 9,3% en 2004-2005 al 10,4% en 2016-2017 (Dirección General de Salud Pública y Participación. Consejería de Salud. Govern de les Illes Balears, 2007) (Dirección General de Salud Pública y Participación. Consejería de Salud. Govern de les Illes Balears, 2018). Además de sus graves consecuencias para la salud a corto y largo plazo, la obesidad infantil representa una carga significativa para el sistema de salud (Ling, Chen, Zahry, & Kao, 2022).

Durante la pandemia de COVID-19 (2020-2021), las medidas de contención, como el confinamiento y el cierre de escuelas, afectaron las rutinas diarias de los niños, incrementando el riesgo de obesidad, especialmente en entornos de bajo nivel socioeconómico (WHO Regional Office for Europe, n.d.). Se ha sugerido que los espacios verdes en los vecindarios pueden desempeñar un papel relevante en la prevención de la obesidad, al promover la actividad física y reducir el estrés, aunque la evidencia sobre su influencia es mixta (Jia et al., 2021).

Estudios previos han demostrado que los barrios con menor nivel socioeconómico están asociados con un mayor riesgo de obesidad infantil (Kim, Cubbin, & Oh, 2019; Vazquez & Cubbin, 2020). Durante la pandemia, estas desigualdades podrían haberse amplificado, afectando de forma más negativa a las comunidades desfavorecidas.

Este estudio analiza la asociación entre la exposición a espacios verdes y el riesgo de obesidad infantil antes y durante la pandemia, y evalúa cómo esta relación varía según el nivel socioeconómico contextual de los vecindarios.

2. METODOS

2.1. Población de estudio

Este estudio se realizó en las Islas Baleares, que cuentan con una población de 1,1 millones de personas, de las cuales el 15,48% son pacientes pediátricos. Se utilizaron datos del Sistema de Información de Atención Primaria (e-SIAP), gestionado por el servicio de salud pública de las Islas Baleares.

Se llevaron a cabo tres cohortes longitudinales en la población pediátrica del e-SIAP, abarcando tres periodos: global (2013-2022), prepandémico (2013-2017) y pandémico (2018-2022). Se incluyeron niños de 2 a 7 años con al menos dos mediciones de altura y peso registradas y que no presentaban obesidad al inicio del estudio. Un total de 40.956 niños participaron en el periodo global, 13.843 en el prepandémico y 20.491 en el pandémico. Los participantes fueron seguidos hasta que cumplieron 15 años, desarrollaron obesidad o finalizaron el periodo de estudio. El Comité de Ética de Investigación aprobó este estudio (CEI: IB 4994/22 PI).

2.2. Medidas

La altura y el peso corporal se recopilaron repetidamente por enfermeras pediátricas durante las visitas de atención primaria, siguiendo un protocolo estandarizado. Los datos depurados se utilizaron para calcular el índice de masa corporal (IMC), definiendo sobrepeso y obesidad según los umbrales de la OMS.

Usamos Google Earth Engine (GEE), una plataforma de procesamiento geoespacial en la nube para el monitoreo y análisis ambiental a gran escala, para medir el NDVI a partir de los datos del satélite Sentinel de Copernicus [2016 y 2020], con una resolución de 10 m x 10 m. Las imágenes se seleccionaron según los siguientes criterios: i) cobertura de nubes inferior al 10%, ii) corrección estándar del terreno (Nivel 1T) y iii) el periodo más verde de 30 días de los años estudiados. Los valores de NDVI se truncaron en 0 (los valores <0 indican agua). El NDVI promedio se calculó a partir de todas las imágenes que cumplieron los criterios de selección anteriores entre abril de 2016 y mayo de 2020 para cada buffer de 300 m de cada sección censal en la región de estudio. Las direcciones de los pacientes se extrajeron del e-SIAP y se geocodificaron a nivel de sección censal (Figura 1).

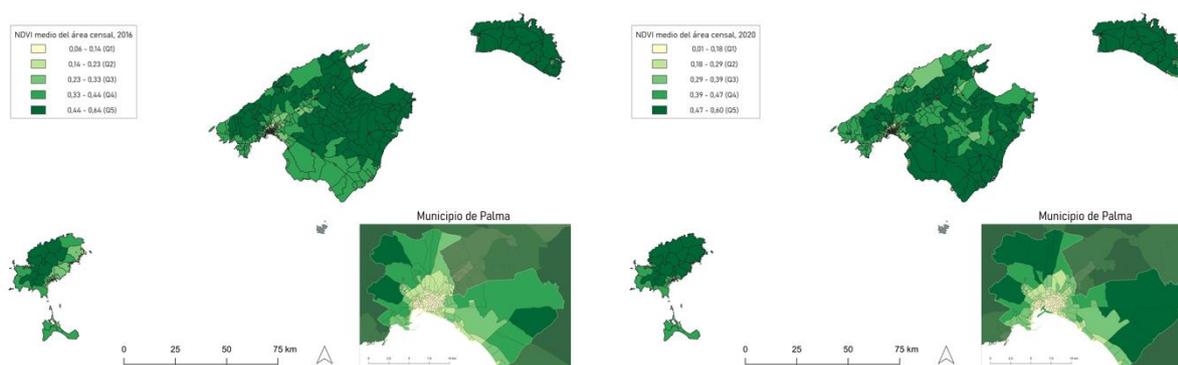


Figura 1. Valores de NDVI medios en área censal 2016 y 2020 en la región de estudio.

Las covariables incluyeron información a nivel individual (sexo, edad y nacionalidad) y a nivel de sección censal (estatus socioeconómico y renta media). El estatus socioeconómico se evaluó usando el Índice de Privación 2011 (IP2011) en cinco quintiles, y la nacionalidad se agrupó en cinco categorías (española, africana, americana, asiática y europea).

2.3. Análisis estadísticos

Se aplicaron análisis de regresión de Cox para evaluar la asociación entre la exposición a espacios verdes (NDVI) y el riesgo de obesidad pediátrica, considerando la exposición tanto como variable continua como categorizada en quintiles. La variable dependiente fue el tiempo hasta desarrollar obesidad, con seguimiento hasta que los niños cumplieron 15 años, desarrollaron obesidad o dejaron el sistema de salud.

Los análisis se ajustaron por edad, sexo, nacionalidad y nivel socioeconómico (IP2011). Inicialmente, se aplicaron modelos crudos con la exposición continua y categorizada, y posteriormente se ajustaron modelos con covariables adicionales como el nivel socioeconómico contextual y la renta media del hogar. La proporcionalidad de los riesgos se verificó con la prueba de cox.zph, y se calcularon razones de riesgo (HR) e intervalos de confianza (IC95).

3. RESULTADOS

El estudio incluyó a 40,956 niños de 2 a 7 años que no presentaban obesidad al inicio y contaban con al menos dos mediciones de altura y peso. El seguimiento fue de una mediana de 5.89 años, con diferencias en la duración entre los periodos prepandémico (3.27 años) y pandémico (3.48 años).

En términos de género, la distribución fue similar entre niñas (48.87%) y niños (51.13%). La mayoría de los participantes tenían entre 2 y 3 años (66.74%), y la mayoría era de nacionalidad española (92.93%). Respecto a la exposición al verdor, un 17.16% residía en áreas con baja exposición y un 17.50% en áreas con alta exposición (Q1 y Q5, respectivamente).

Tabla 1. Características de las cohortes longitudinales retrospectivas abiertas.

	Global 2013-2022	Prepandemia 2013-2017	Pandemia 2018-2022
Total	40956	13843	20491
Casos	5527 (16.71%)	1430 (12.51)	2142 (12.9)
Tiempo de seguimiento, mediana años (p25; p75)	5.89 (3.54;8.48)	3.27 (2.84;3.92)	3.48 (3.12;3.93)
Sexo			
<i>Femenino</i>	20014 (48.87%)	6799 (49.12%)	10037 (48.98%)
<i>Masculino</i>	20942 (51.13%)	7044 (50.88%)	10454 (51.02%)
Grupo de edad (años)			
2-3	27334 (66.74%)	4875 (35.22%)	10537 (51.42%)
4-5	5953 (14.54%)	4153 (30%)	4657 (22.73%)
6-7	7669 (18.72%)	4815 (34.78%)	5297 (25.85%)
IP2011			
<i>Quintil 1 Bajo (mejor)</i>	5456 (13.32%)	1967 (14.21%)	2684 (13.1%)
<i>Quintil 2</i>	10417 (25.43%)	3561 (25.72%)	5258 (25.66%)
<i>Quintil 3</i>	11776 (28.75%)	4081 (29.48%)	5902 (28.8%)
<i>Quintil 4</i>	9360 (22.85%)	3008 (21.73%)	4714 (23.01%)
<i>Quintil 5 Alto (peor)</i>	3947 (9.64%)	1226 (8.86%)	1933 (9.43%)
NDVI			
<i>Quintil 1</i>	7030 (17.16%)	2269 (16.39%)	3730 (18.2%)
<i>Quintil 2</i>	9493 (23.18%)	3222 (23.28%)	4692 (22.9%)
<i>Quintil 3</i>	9456 (23.09%)	3281 (23.7%)	4640 (22.64%)
<i>Quintil 4</i>	7810 (19.07%)	2654 (19.17%)	3873 (18.9%)
<i>Quintil 5</i>	7167 (17.5%)	2417 (17.46%)	3556 (17.35%)

Los modelos de Cox ajustados mostraron que un aumento en la exposición al verdor se asoció con una menor incidencia de obesidad (HR: 0.827; IC 95%: 0.786–0.871), con un efecto protector del 19.3% en el periodo pre-pandémico y del 18.0% en el pandémico. No se observó una diferencia significativa entre ambos periodos ($p=0.78$), lo que sugiere que la pandemia no alteró la relación general entre el verdor y la obesidad.

El análisis por quintiles mostró una disminución del riesgo de obesidad con mayor exposición al verdor. Los niños en el quintil más alto (Q5) presentaron una reducción significativa del riesgo (HR: 0.762; IC 95%: 0.696–0.833) comparado con el quintil más bajo (Q1). Durante la pandemia, el segundo quintil mostró una reducción significativa del riesgo (HR: 0.737; IC 95%: 0.649–0.838), posiblemente debido a un mayor uso de los espacios verdes.

Tabla 2. Asociación entre NDVI y Obesidad.

	Global 2013-2022	Prepandemia 2013-2017	Pandemia 2018-2022	Pandemia VS Pandemia 2013-2017 vs 2017-2022	
	HR (95% CI)	HR (95% CI)	HR (95% CI)	Ratio Test (95% CI)	Test of Interaction
NDVI *					
<i>NDVI (por IQR)</i>	0.827 (0.786 to 0.871)	0.807 (0.729 to 0.892)	0.820 (0.755 to 0.891)	0.984 (0.863 to 1.121)	0.78
<i>Baja Exposición (Q1)</i>	ref	ref	ref	ref	0.03
<i>Exposición Moderada Baja (Q2)</i>	0.835 (0.770 to 0.906)	1.021 (0.873 to 1.195)	0.737 (0.649 to 0.838)	1.385 (1.131 to 1.696)	
<i>Exposición Moderada (Q3)</i>	0.810 (0.747 to 0.879)	0.846 (0.720 to 0.994)	0.728 (0.641 to 0.827)	1.163 (0.947 to 1.428)	
<i>Exposición Moderada Alta (Q4)</i>	0.754 (0.691 to 0.823)	0.765 (0.641 to 0.912)	0.687 (0.599 to 0.788)	1.113 (0.890 to 1.391)	
<i>Alta Exposición (Q5)</i>	0.762 (0.696 to 0.833)	0.775 (0.648 to 0.925)	0.726 (0.632 to 0.835)	1.067 (0.851 to 1.337)	

La relación entre el NDVI y la obesidad varió según el nivel socioeconómico. En áreas de mayor privación (Q5), la reducción del riesgo fue más modesta durante la pandemia (HR: 0.691; IC 95%: 0.518–0.923) comparado con el periodo pre-pandémico (HR: 0.843; IC 95%: 0.619–1.148), sugiriendo que las barreras de acceso y la vulnerabilidad socioeconómica limitaron los beneficios de los espacios verdes.

Tabla 3. Características de las cohortes longitudinales retrospectivas abiertas.

	Global 2013-2022	Prepandemia 2013-2017	Pandemia 2018-2022	Pandemia VS Pandemia 2013-2017 vs 2017-2022	
	HR (95% CI)	HR (95% CI)	HR (95% CI)	Ratio Test (95% CI)	Test of Interaction
IP2011					
<i>NDVI (per IQR) (Q1 IP2011)</i>	0.745 (0.616 to 0.901)	0.752 (0.552 to 1.024)	0.756 (0.581 to 0.983)	0.916 (0.587 to 1.428)	0.50
<i>NDVI (per IQR) (Q2 IP2011)</i>	0.775	0.703	0.799	0.888	0.46

	(0.695 to 0.863)	(0.572 to 0.863)	(0.677 to 0.943)	(0.677 to 1.166)	
NDVI (per IQR) (Q3 IP2011)	0.841 (0.765 to 0.925)	0.819 (0.678 to 0.988)	0.927 (0.792 to 1.085)	0.865 (0.681 to 1.099)	0.29
NDVI (per IQR) (Q4 IP2011)	0.861 (0.777 to 0.954)	0.921 (0.745 to 1.139)	0.807 (0.681 to 0.956)	1.159 (0.885 to 1.518)	0.35
NDVI (per IQR) (Q5 IP2011)	0.848 (0.714 to 1.008)	0.843 (0.619 to 1.148)	0.691 (0.518 to 0.923)	1.233 (0.788 to 1.931)	0.23

4. DISCUSIÓN

Los resultados de este estudio confirman el efecto protector de los espacios verdes en la reducción del riesgo de obesidad infantil, consistente en los periodos prepandémico y pandémico. La pandemia no alteró sustancialmente esta relación, pero se observó un mayor impacto del verdor en la prevención de la obesidad en áreas con exposición moderada (Q2) durante el periodo pandémico. Esto podría deberse a un mayor uso de estos espacios cuando otras actividades estaban restringidas.

Sin embargo, el efecto protector fue menor en áreas de mayor privación socioeconómica (Q5), probablemente por barreras de acceso o limitaciones en la calidad de los espacios verdes. Los niños en áreas más favorecidas mostraron una reducción del riesgo de obesidad más consistente, lo que resalta la importancia del nivel socioeconómico en los beneficios de los espacios verdes.

Estos hallazgos subrayan la necesidad de políticas urbanas que promuevan el acceso equitativo a espacios verdes de calidad, especialmente en áreas con mayores niveles de privación. La pandemia resaltó la importancia de estos entornos para la salud infantil, no solo para la actividad física, sino también para la reducción del riesgo de obesidad.

5. CONCLUSIONES

Los resultados sugieren que, aunque el efecto protector de los espacios verdes en la reducción del riesgo de obesidad se mantuvo estable, la pandemia pudo haber exacerbado las desigualdades en los beneficios. Áreas con baja exposición al verdor pudieron haber experimentado mayores beneficios debido a un mayor uso de estos espacios durante el confinamiento, mientras que en áreas más desfavorecidas los efectos fueron menos consistentes.

Estas conclusiones resaltan la necesidad de garantizar el acceso a espacios verdes de calidad en comunidades vulnerables, y de implementar intervenciones que consideren el contexto socioeconómico en momentos de crisis, como la pandemia de COVID-19.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio fue financiado por la beca posdoctoral PD-033-2022 Margalida Comas otorgada a [A.C.] por el Gobierno de las Islas Baleares. Durante la preparación del trabajo presentado, [A.C.] disfrutó de una beca de movilidad CAS22/00302 "José Castillejo" para jóvenes doctores, otorgada por el Ministerio de Universidades en el marco del Programa Estatal de Desarrollo, Atracción y Retención de Talento, un subprograma estatal de Movilidad, del Plan Estatal de Investigación Científica, Técnica y de Innovación 2021-2023.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Bravo-Saquicela, D. M., Sabag, A., Rezende, L. F. M., & Rey-Lopez, J. P. (2022). Has the Prevalence of Childhood Obesity in Spain Plateaued? A Systematic Review and Meta-Analysis. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(9), 5240. <https://doi.org/10.3390/IJERPH19095240/S1>
- De Bont, J., Díaz, Y., Casas, M., García-Gil, M., Vrijheid, M., & Duarte-Salles, T. (2020). Time Trends and Sociodemographic Factors Associated With Overweight and Obesity in Children and Adolescents in Spain. *JAMA Network Open*, 3(3), e201171–e201171. <https://doi.org/10.1001/JAMANETWORKOPEN.2020.1171>

- Dirección General de Salud Pública y Participación. Consejería de Salud. Govern de les Illes Balears. (2007). *Prevalencia de la obesidad infantil y juvenil en las Illes Balears (EPOIB) 2004-05*.
- Jia, P., Cao, X., Yang, H., Dai, S., He, P., Huang, G., ... Wang, Y. (2021). Green space access in the neighbourhood and childhood obesity. *Obesity Reviews*, 22(S1), e13100. <https://doi.org/10.1111/OBR.13100>
- Kim, Y., Cubbin, C., & Oh, S. (2019). A systematic review of neighbourhood economic context on child obesity and obesity-related behaviours. *Obesity Reviews*, 20(3), 420–431. <https://doi.org/10.1111/OBR.12792>
- Ling, J., Chen, S., Zahry, N. R., & Kao, T. S. A. (2022). Economic burden of childhood overweight and obesity: A systematic review and meta-analysis. *Obesity Reviews*, e13535. <https://doi.org/10.1111/OBR.13535>
- Malecka-Tendera, E., & Mazur, A. (2006). Childhood obesity: a pandemic of the twenty-first century. *International Journal of Obesity* 2006 30:2, 30(2), S1–S3. <https://doi.org/10.1038/sj.ijo.0803367>
- Vazquez, C. E., & Cubbin, C. (2020). Socioeconomic Status and Childhood Obesity: a Review of Literature from the Past Decade to Inform Intervention Research. *Current Obesity Reports*, 9(4), 562–570. <https://doi.org/10.1007/S13679-020-00400-2/FIGURES/1>
- WHO Regional Office for Europe. (n.d.). *Report on the impact of the COVID-19 pandemic on the daily routine and behaviours of school-aged children: results from 17 Member States in the WHO European Region*.
- World Health Organization. (2021). *European Childhood Obesity Surveillance Initiative (COSI) Report on the fourth round of data collection*. Retrieved from <http://apps.who.int/bookorders>.

Integración de parcelas de inventario y de teledetección para modelizar la recuperación post-incendio de comunidades arbóreas mediterráneas

M. Rodrigues^{1,2*}, J. de la Riva^{1,2}, D. Domingo^{2,3}, M.T. Lamelas^{2,4}, P. Ibarra^{1,2}, R. Hoffrén^{1,2}, A. García-Martín^{2,4}

¹ Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio-GEOFOREST-IUCA Universidad de Zaragoza. C. Pedro Cerbuna 12, 50009 Zaragoza (Aragón).

² Grupo Geoforest, Instituto Universitario de Ciencias Ambientales de Aragón (IUCA), Universidad de Zaragoza, C. Pedro Cerbuna 12, 50009 Zaragoza (Aragón).

³ EiFAB-iuFOR, Universidad de Valladolid, Campus Duques de Soria, Soria (Castilla y León).

⁴ Centro Universitario de la Defensa de Zaragoza, Academia General Militar. Crta. de Huesca s/n, 50009 Zaragoza (Aragón).

rmarcos@unizar.es, <https://orcid.org/0000-0002-0477-0796>

delariva@unizar.es, <https://orcid.org/0000-0003-2615-270X>

dario.domingo@uva.es, <https://orcid.org/0000-0002-8362-7559>

tlamelas@unizar.es, <https://orcid.org/0000-0002-8954-7517>

pibarra@unizar.es, <https://orcid.org/0000-0003-3901-164X>

rhoffren@unizar.es, <https://orcid.org/0000-0002-9123-304X>

alqarcia@unizar.es, <https://orcid.org/0000-0003-2610-7749>

RESUMEN: En este estudio se analiza el potencial de recuperación post-incendio de cuatro comunidades arbóreas mediterráneas representativas (*Pinus halepensis*, *Pinus nigra*, *Pinus pinaster* y *Quercus ilex*) afectadas por grandes incendios forestales (> 500 ha) durante el verano de 1994 en España. Para ello, se combinó información recogida en campo 25 años después de los incendios en 203 parcelas arboladas (131 quemadas y 72 de control sin quemar) con datos de teledetección, información geoespacial e inventarios forestales, con el fin de construir un modelo empírico capaz de evaluar el grado de recuperación. Los datos de teledetección permitieron calcular la severidad del fuego mediante el Composite Burn Index, mientras que la topografía local (pendiente y orientación) fueron obtenidos de modelos digitales del terreno creados a partir de datos LiDAR-PNOA. Los datos geoespaciales incluían información climática sobre la evolución de la temperatura y las precipitaciones. Estos datos se introdujeron en el modelo, calibrado mediante Random Forest, para conocer el grado de recuperación, inferido a partir de la similitud (en términos de altura de la vegetación, biomasa aérea y diversidad de especies) entre las parcelas quemadas y las no quemadas (control). Los resultados mostraron que sólo el 25% de las parcelas quemadas pueden ser consideradas como recuperadas. La severidad del fuego a corto plazo tiene un efecto significativo en la recuperación, aunque fuertemente modulado por la topografía local. Las características clave de las parcelas recuperadas fueron una severidad del fuego de baja a moderada y un entorno topográfico favorable, especialmente el efecto de sombreado de las laderas con orientación noroeste. Además, un clima más cálido y húmedo parece incrementar la capacidad de recuperación.

Palabras-clave: recuperación post-incendio, severidad, regeneración, grandes incendios.

1. INTRODUCCIÓN

Las comunidades y especies vegetales en ecosistemas propensos al fuego se enfrentan a incendios cada vez más extremos y frecuentes que ponen en peligro su persistencia (Pausas et al., 2017). Los ecosistemas mediterráneos han convivido tradicionalmente con el fuego, lo que ha llevado a las especies y comunidades forestales a desarrollar diferentes adaptaciones (por ejemplo, serotinia, rebrote o espesor de la corteza) para coexistir con él, promoverlo o resistirlo (Keeley, 2012; McLaughlan et al., 2020; Pausas et al., 2017). Sin embargo, la mayor recurrencia de incendios puede reducir la capacidad de las especies adaptadas al fuego

para recuperarse tras él.

Además, los incendios forestales se están expandiendo hacia nuevos territorios, afectando a comunidades forestales que carecen de rasgos y estrategias (por ejemplo, serotinia o rebrote) que les permitan hacerles frente (Nolan et al., 2021). Estas comunidades, como puede ser el caso de los pinares de pino negro o laricio, experimentan largos periodos sin incendios lo que contribuye a mantener un microclima fresco y húmedo dificultando la combustión. Sin embargo, en condiciones extremadamente secas y/o de fuertes vientos se pueden activar incendios, alterando un ecosistema que de otro modo estaría libre de incendios, fomentando trayectorias sucesionales hacia una masa forestal más inflamable (Pausas y Bond, 2020).

El seguimiento y análisis de las trayectorias post-incendio de las comunidades forestales es de vital importancia para comprender su potencial de recuperación y los factores subyacentes. Se han publicado numerosos trabajos acerca de la recuperación de la vegetación tras el fuego, con un papel destacado del uso de técnicas de teledetección (Pérez-Cabello et al., 2021). Sin embargo, existen varios inconvenientes y limitaciones que impiden que estas técnicas proporcionen una visión completa por sí solas. Por ejemplo, no hay homogeneidad en la definición del propio término "recuperación" (Bartels et al., 2016) y la conexión entre la respuesta espectral y los procesos ecológicos es muchas veces difusa (Celebrezze et al., 2024; Pickell et al., 2016).

En este trabajo se presenta una evaluación del potencial de recuperación de las comunidades arbóreas de bosque mediterráneo afectadas por incendios forestales. Desarrollamos y mostramos un procedimiento en el que se combinan técnicas de aprendizaje no supervisado (análisis de conglomerados) y supervisado (clasificación mediante Random Forest para determinar el grado de recuperación, comparando parcelas quemadas y no quemadas, con el fin de investigar los principales factores determinantes de la misma: la severidad del fuegadura, la topografía, la estrategia reproductiva y el clima.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio y red de parcelas inventariadas

La evaluación de la recuperación post-incendio se llevó a cabo en 6 grandes incendios forestales ocurridos durante el verano de 1994 (Montmajor, Uncastillo, Villarluengo, Requena, Moratalla y Yeste, Tabla 1). Se muestreó una red de parcelas durante varias campañas de campo en los años 2017 y 2018, aproximadamente 25 años después de los incendios. Se inventariaron un total de 203 parcelas: 72 no quemadas y 131 quemadas, considerando además la severidad del fuego, evaluada mediante el índice GeoCBI (De Santis et al., 2009; De Santis and Chuvieco, 2009). (92 de severidad alta, 20 de severidad media y 19 de severidad baja).

Tabla 1. Descripción de los incendios, resumen de las parcelas estudiadas e imágenes utilizadas.

Municipio	Superficie (ha)	Fecha ignición	Nº Parcelas	Fechas inventario campo	Fecha cálculo severidad
Montmajor	43.774,45	04/07/1994	36	2017/07/18 - 2017/07/24	1994/07/24
Requena	38.750,15	05/07/1994	62	2017/11/11 - 2018/01/10	1995/08/01
Moratalla	28.352,83	04/07/1994	24	2018/02/14 - 2018/02/15	1994/08/16
Uncastillo	10.120,41	15/07/1994	22	2016/07/07 - 2017/06/30	1994/08/23
Villarluengo	29.118,80	01/07/1994	39	2017/07/08 - 2017/07/16	1994/08/16
Yeste	12.669,33	07/08/1994	20	2018/12/23 - 2018/12/24	1994/08/23
TOTAL	162.785,97		203		

2.2. Caracterización de la recuperación

La premisa para evaluar la recuperación fue que las parcelas quemadas con mayor parecido a controles no quemados se considerarían "recuperadas", mientras que el resto de las parcelas se etiquetarían como "aún no recuperadas". El grado de similitud se evaluó comparando las principales características incluyendo: la altura del estrato arbóreo (altura máxima y media; en metros), la fracción de cobertura a lo largo del gradiente vertical de estratos de acuerdo con la escala de Braun-Blanquet (1979) Braun-Blanquet (1979) (en porcentaje), la cantidad de biomasa por encima del suelo de especies arbóreas y arbustivas, por separado (en toneladas/ha) y la abundancia de especies, incluyendo especies arbóreas, arbustivas y herbáceas (número de especies distintas) presentes en la parcela. Los datos sobre estas características se sometieron a un análisis de conglomerados para organizar las parcelas (quemadas y no quemadas) en "tipos estructurales"

específicos en función de su grado de similitud. Esto nos permitió determinar el nivel de recuperación, identificando las parcelas quemadas que comparten grupo con la mayoría de parcelas no quemadas, es decir, parcelas quemadas que se parecen al control no quemado.

2.3. Modelado de la probabilidad de recuperación

La probabilidad de recuperación tras el incendio se evaluó mediante algoritmos de clasificación binaria entrenados con Random Forest (RF; Breiman, 2001). Las parcelas quemadas agrupadas en el análisis de conglomerados con el control no quemado se etiquetaron como "recuperadas", mientras que las parcelas quemadas situadas en el grupo más distante de las parcelas no quemadas se etiquetaron como "no recuperadas" (sección 2.2). Se entrenaron y validaron 1000 modelos combinando las clases mencionadas y el conjunto de variables predictoras relacionadas con el potencial de recuperación. Se analizaron las clases de severidad del fuego, la estrategia reproductiva dominante, la orientación y pendiente del relieve, y las condiciones climáticas en términos de precipitación y temperatura medias y sus respectivas tendencias.

3. RESULTADOS

Los grupos obtenidos (Figura 1) muestran un "tipo estructural" que servirá posteriormente de referencia para evaluar la fase de recuperación. Se identificaron parcelas de "bosque dominado por árboles" con un dosel arbóreo bien desarrollado, que mostraban una altura máxima y media superiores a la media (puntuación $Z > 0$), predominancia de cobertura en el estrato 5 (>5m de altura) y de biomasa arbórea, y un mayor número de especies. Estas parcelas también mostraron una cobertura inferior a la media de los estratos intermedios (2 a 4; de 1 a 4 m) y una cobertura superior a la media del estrato 1 (especies herbáceas), lo que indica un bosque arbóreo bien desarrollado con una densa capa de copas y un sotobosque desnudo. Un segundo grupo con parcelas en una fase de "bosque de transición", con una cobertura significativa, superior a la media en el estrato 4 (de 3 a 5 m), altas cargas de biomasa arbustiva y un número de especies inferior a la media. Estas parcelas correspondían a comunidades arbóreas y arbustivas homogéneas con un sotobosque denso. En el tercer conglomerado, denominado "matorrales y pastizales", identificamos aquellas parcelas con dominancia de estratos bajos (2 y 3) con cargas de biomasa bajas, y árboles y arbustos pequeños.

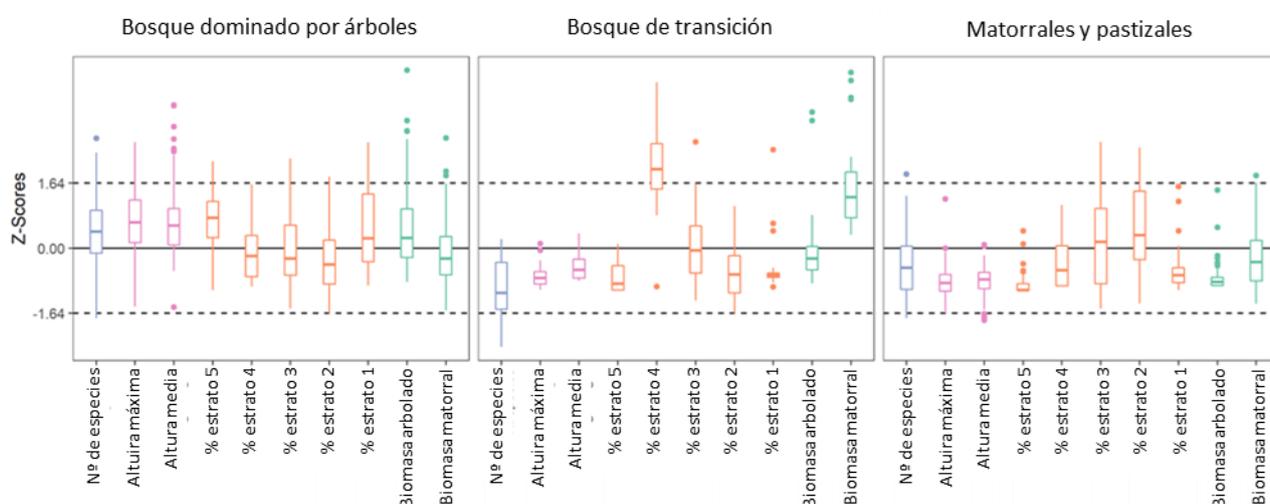


Figura 42. Agrupaciones resultantes del análisis de conglomerados.

Los modelos de recuperación se entrenaron considerando las 33 parcelas quemadas clasificadas como "bosque dominado por árboles" como recuperadas (o casi recuperadas; 12 experimentaron una severidad de quemado alta, 9 severidad de quemado media y 12 severidad de quemado baja) y las 49 parcelas clasificadas como "matorrales y pastizales" como aún no recuperadas. No se tuvieron en cuenta las parcelas de la categoría "bosque de transición" por considerar que se encontraban en una fase intermedia. A pesar de un cierto grado de variabilidad, los modelos alcanzaron una elevada precisión de clasificación ($AUC=0,87\pm 0,02$, $n=1000$).

La severidad es el principal factor determinante de la recuperación post-incendio, con aproximadamente 0,30 menos probabilidad cuando se producen incendios de alta severidad (Figura 2A). Las pendientes pronunciadas (>15% de inclinación) y la orientación noroeste (270 a 360 grados azimutales) aumentan la posibilidad de recuperación en una probabilidad marginal de 0,20 (Figura 2C y 2D). En menor medida, se ha

observado que las condiciones climáticas modulan también la recuperación. En general, las temperaturas más bajas tienen relación con un mayor potencial de recuperación (Figura 2H), aunque el mayor efecto lo encontramos en las tendencias climáticas. Se observa que, al aumentar las temperaturas medias anuales y las precipitaciones anuales, la probabilidad de recuperación se incrementa en un margen de 0,15. La estrategia reproductiva dominante (Figura 2B) aparece como el factor menos importante. El modelo atribuye una menor probabilidad de recuperación a las comunidades serótinas, aunque creemos que esto está relacionado con el hecho de que esta comunidad se vio más afectada por una menor severidad en los incendios de 1994 y, por tanto, en nuestra red de parcelas. Se puede argumentar que la menor diferencia en la probabilidad por estrategias reproductivas (0,05) en comparación con los niveles de severidad (0,30) indica indirectamente un efecto positivo en la recuperación de las comunidades serótinas.

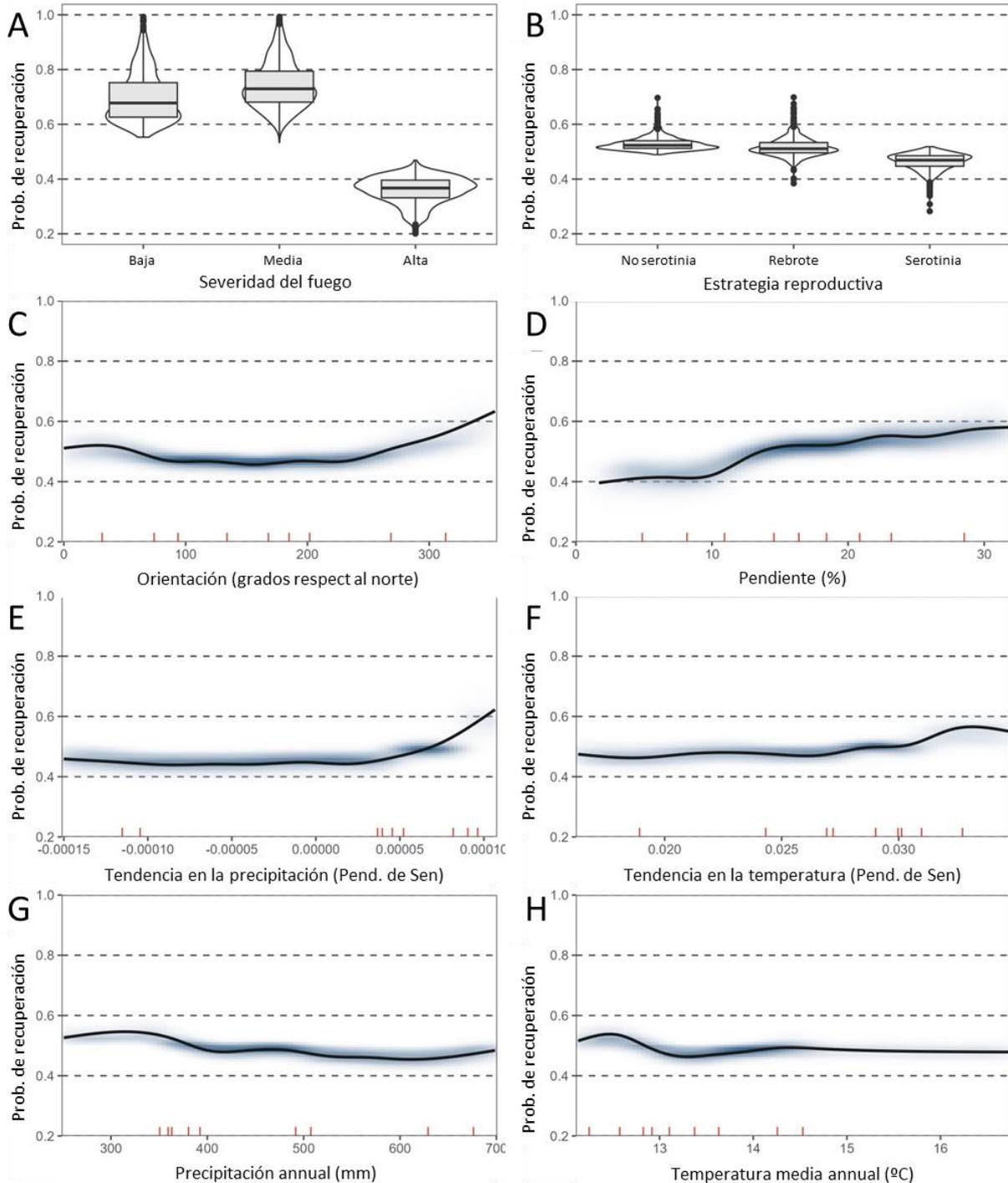


Figura 43. Relaciones entre predictores de la recuperación (eje x) y probabilidad marginal de recuperación (eje y).

4. DISCUSIÓN

La intensidad y la severidad del fuego determinan la dinámica post-incendio en la mayoría de las comunidades forestales (Keeley, 2009). En consonancia con la bibliografía, nuestros resultados sugieren que la severidad es el principal factor que determina la recuperación tras un incendio (Chen et al., 2011; Smith-Ramírez et al., 2022). Hemos encontrado una disminución de 0,30 en la probabilidad de recuperación tras incendios de alta severidad a c. En ambientes mediterráneos, como los analizados en este trabajo, el nivel de severidad del fuego está estrechamente asociado al tipo de comunidad forestal. Los bosques de pino carrasco (*Pinus halepensis*), que están bien adaptados a los incendios forestales y muestran una rápida respuesta de recuperación, a menudo experimentan una alta severidad (Pausas et al., 2008). No obstante, pese a haber experimentado mayor severidad, las comunidades serótinas mostraron tasas de recuperación similares al resto de estrategias. Del mismo modo, las comunidades rebrotadoras se consideran habitualmente como "zonas de protección" debido a su mayor resiliencia (Nolan et al., 2021). Por otro lado, los reclutadores no seróticos (por ejemplo, *Pinus nigra*) tienden a experimentar niveles de severidad más bajos fomentados por condiciones frescas y húmedas (Pausas y Bond, 2020).

La probabilidad de recuperación se ve modulada en gran medida por la configuración del relieve, con una probabilidad de recuperación 0,20 mayor bajo condiciones topográficas adecuadas. Las pendientes superiores al 15% y orientadas al noroeste representan las condiciones óptimas para la recuperación. La combinación de estas condiciones ejerce un efecto de protección frente a la insolación que ayuda a preservar la vegetación y la humedad del suelo. Existe consenso en que las laderas orientadas al norte favorecen el desarrollo de la vegetación, pero se ha señalado que la pendiente del terreno favorece (Smith-Ramírez et al., 2021, 2022) o limita (Viana-Soto et al., 2020) la recuperación post-incendio. Nosotros preveíamos -y hemos confirmado- un efecto positivo de la pendiente (a mayor pendiente mayor probabilidad de recuperación) ya que hemos analizado comunidades arboladas con suelos bien desarrollados y capaces de sustentar la vegetación. Los factores climáticos regulan en menor medida la recuperación. La evolución de la temperatura y las precipitaciones influyó más que las condiciones promedio normales (Figura 2E-H). Unas temperaturas cada vez más cálidas y lluviosas potencian la probabilidad de recuperación en un margen de 0,15. El menor efecto desempeñado por las condiciones climáticas a escala regional en comparación con la topografía implica que las condiciones microclimáticas son más importantes. La temperatura es el principal factor limitante para el desarrollo fisiológico de las especies arbóreas a escala global (Körner y Paulsen, 2004). Asimismo, la abundancia de precipitaciones durante la primavera y el otoño son claves en el establecimiento y crecimiento de especies mediterráneas como *Pinus halepensis* (Touchan et al., 2017).

Los resultados de nuestro estudio son relevantes para la reducción del riesgo de incendio y la planificación forestal, aunque deben enmarcarse adecuadamente. En la mayoría de las parcelas quemadas todavía se aprecia el efecto de los incendios forestales. De las 131 parcelas quemadas, sólo 33 se clasificaron como recuperadas, y la mayoría de ellas aún muestran algunas diferencias con las comunidades forestales vecinas no quemadas. Esto sugiere que es necesario un periodo de recuperación más largo.

5. CONCLUSIONES

Transcurridos 25 años, el 75% de las parcelas quemadas (98 de 131) aún no pueden considerarse recuperadas, encontrándose todavía en un estado de transición. El 25% que alcanzó un estado suficientemente similar al control no quemado lo hizo cuando se vieron afectadas por una severidad del fuego moderada o se encontraban en entornos ambientales que favorecían la recuperación. El efecto de sombra de las laderas noroccidentales con pendientes pronunciadas resultó clave para alcanzar un desarrollo consistente del dosel. Un clima más cálido y húmedo también incrementa las posibilidades de recuperación.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación, proyecto FIREPATHS [PID2020-116556RA-I00] y proyecto SERGISAT [CGL2014-57013-C2-2-R], y por el Gobierno de Aragón [Geoforest S51_23R cofinanciado con FEDER "Construyendo Europa desde Aragón"]. El autor agradece el apoyo a través de la beca Postdoc Margarita Salas financiada por la Unión Europea-Next GenerationEU a Darío Domingo [MS-240621].

6. BIBLIOGRAFÍA

- Bartels, S. F., Chen, H. Y. H., Wulder, M. A., y White, J. C. (2016). Trends in post-disturbance recovery rates of Canada's forests following wildfire and harvest. *Forest Ecology and Management*, 361, 194-207. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.11.015>
- Braun-Blanquet, J. (1979). *Fitosociología. Bases para el estudio de las comunidades vegetales*. Blum.
- Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine Learning*, 45(1), 5-32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
- Celebrezze, J. V., Franz, M. C., Andrus, R. A., Stahl, A. T., Steen-Adams, M., y Meddens, A. J. H. (2024). A fast spectral recovery does not necessarily indicate post-fire forest recovery. *Fire Ecology*, 20(1), 54. <https://doi.org/10.1186/s42408-024-00288-6>
- Chen, X., Vogelmann, J. E., Rollins, M., Ohlen, D., Key, C. H., Yang, L., Huang, C., y Shi, H. (2011). Detecting post-fire burn severity and vegetation recovery using multitemporal remote sensing spectral indices and field-collected composite burn index data in a ponderosa pine forest. *International Journal of Remote Sensing*, 32(23), 7905-7927. <https://doi.org/10.1080/01431161.2010.524678>
- De Santis, A. y Chuvieco, E., 2009. GeoCBI: A modified version of the Composite Burn Index for the initial assessment of the short-term burn severity from remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment* (113), 554-562. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.10.011>
- De Santis, A., Chuvieco, y E., Vaughan, P. (2009). Short-term assessment of burn severity using the inversion of PROSPECT and GeoSail models. *Remote Sensing of Environment* (113), 126-136. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.08.008>
- Keeley, J. E. (2009). Fire intensity, fire severity and burn severity: A brief review and suggested usage. *International Journal of Wildland Fire*, 18(1), 116-126. <http://dx.doi.org/10.1071/WF07049>
- Keeley, J. E. (2012). Ecology and evolution of pine life histories. *Annals of Forest Science*, 69(4), 445-453. <https://doi.org/10.1007/s13595-012-0201-8>
- Körner, C., y Paulsen, J. (2004). A world-wide study of high altitude treeline temperatures. *Journal of Biogeography*, 31(5), 713-732. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2003.01043.x>
- McLauchlan, K. K., Higuera, P. E., Miesel, J., Rogers., ... Watts, A. C. (2020). Fire as a fundamental ecological process: Research advances and frontiers. *Journal of Ecology*, 108(5), 2047-2069. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13403>
- Nolan, R. H., Collins, L., Leigh, A., Ooi, M. K. J., Curran, T. J., Fairman, T. A., Resco de Dios, V., y Bradstock, R. (2021). Limits to post-fire vegetation recovery under climate change. *Plant, Cell & Environment*, 44(11), 3471-3489. <https://doi.org/10.1111/pce.14176>
- Pausas, J. G., y Bond, W. J. (2020). Alternative Biome States in Terrestrial Ecosystems. *Trends in Plant Science*, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2019.11.003>
- Pausas, J. G., Keeley, J. E., y Schwilk, D. W. (2017). Flammability as an ecological and evolutionary driver. *Journal of Ecology*, 105(2), 289-297. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12691>
- Pérez-Cabello, F., Montorio, R., y Alves, D. B. (2021). Remote sensing techniques to assess post-fire vegetation recovery. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 21, 100251. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2021.100251>
- Pickell, P. D., Hermosilla, T., Frazier, R. J., Coops, N. C., y Wulder, M. A. (2016). Forest recovery trends derived from Landsat time series for North American boreal forests. *International Journal of Remote Sensing*, 37(1), 138-149. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2015.1126375>
- Smith-Ramírez, C., Castillo-Mandujano, J., Becerra, P., Sandoval, N., Allende, R., y Fuentes, R. (2021). Recovery of Chilean Mediterranean vegetation after different frequencies of fires. *Forest Ecology and Management*, 485, 118922. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.118922>
- Smith-Ramírez, C., Castillo-Mandujano, J., Becerra, P., Sandoval, N., Fuentes, R., Allende, R., y Acuña, M. P. (2022). Combining remote sensing and field data to assess recovery of the Chilean Mediterranean vegetation after fire: Effect of time elapsed and burn severity. *Forest Ecology and Management*, 503, 119800. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119800>

- Touchan, R., Anchukaitis, K. J., Meko, D. M., Kerchouche, D., Slimani, S., Ilmen, R., Hasnaoui, F., Guibal, F., Camarero, J. J., Sánchez-Salguero, R., Piermattei, A., Sesbou, A., Cook, B. I., Sabir, M., y Touchane, H. (2017). Climate controls on tree growth in the Western Mediterranean. *The Holocene*, 27(10), 1429-1442. <https://doi.org/10.1177/0959683617693901>
- Viana-Soto, A., Aguado, I., Salas, J., y García, M. (2020). Identifying Post-Fire Recovery Trajectories and Driving Factors Using Landsat Time Series in Fire-Prone Mediterranean Pine Forests. *Remote Sensing*, 12(9). <https://doi.org/10.3390/rs12091499>

Geopolítica del ciberespacio y su cartografía. El caso de la desinformación prorrusa en el País Vasco y Cataluña

A. Borràs Rius¹

¹ Doctor en Geopolítica por la Universidad Carlos III de Madrid y codirector de Cassini Spain – Parque Científico Tecnológico de la Universidad Carlos III de Madrid. Av. Gregorio Peces Barba, 1, 28918, Leganés (Madrid).

a.borras@cassini.group, <https://orcid.org/0009-0007-4288-7139>

RESUMEN: Con la revolución digital de las últimas décadas, han surgido nuevas herramientas y métodos para el análisis de cuestiones territoriales. Las tecnologías de Sistemas de Información Geográfica (SIG), por ejemplo, han irrumpido con fuerza en la ciencia geográfica, aportando una capacidad sin precedentes para el tratamiento de datos masivos georreferenciados. No son tan evidentes las recientes contribuciones del tratamiento de datos masivos (Big Data) de Internet ni los intentos de cartografiar estos datos o de asignarles una lógica espacial, ya que el ciberespacio no cuenta con fronteras claras. A pesar de ello, ciertos autores han empezado a contribuir al desarrollo de la cartografía de Internet mediante datos relacionales obtenidos a través de la recolección de grandes volúmenes de datos de redes sociales o sitios web, utilizando herramientas denominadas Interfaces de Programación de Aplicaciones (API). Este estudio demostrará las capacidades y límites de la cartografía de las redes sociales e Internet mediante estos datos y cómo el tratamiento algorítmico permite visualizar relaciones de poder, identificando espacios de penetración de desinformación, algunas veces bajo una clave territorial. Para ello, se analizarán las interacciones en las redes sociales de Telegram en el caso del País Vasco con el fin de comprender la problemática de la desinformación o guerra informativa prorrusa en el ciberespacio vasco. Como se podrá apreciar, comprobaremos cuáles son las comunidades de actores que difunden contenido prorruso durante los últimos años en un contexto de guerra en Ucrania (2022-2024), ya sean agentes internos o externos de España, resaltando los más relevantes, y las comunidades que mantienen una mayor porosidad a estos discursos. Podremos demostrar cuáles de estos actores mantienen una cercanía a los partidos políticos abertzales, evidenciando la cercanía y penetración de contenido prorruso.

Palabras-clave: Ciberespacio, Territorio, Desinformación, Redes Sociales, Cartografía.

1. INTRODUCCIÓN: GEOPOLÍTICA DEL CIBERESPACIO Y SU CARTOGRAFÍA

La revolución digital ha constituido la adopción masiva de tecnologías de información e interconexión mundial de sistemas de información y de comunicación, conllevando una transformación profunda de prácticas sociales, económicas y políticas de las sociedades, con una incidencia mayor que la escritura o la imprenta (A. Kissinger H., Schmidt E., Huttenlocher D., 2021). Además, con el despliegue masivo de la Inteligencia Artificial (IA), esta transformación se verá agudizada al extremo con una celeridad de cambios tecnológicos nunca vistos en la humanidad. Con todo ello llegan otros tipos de conflictos y desafíos geopolíticos. Estos nuevos escenarios, con una exponencial velocidad de cambio tecnológico, necesitarán no obstante de una atención y supervisión acuciosa, también en el ámbito político. La aparición particular de las redes sociales rompió con la anterior jerarquización de la información, provocando un fenómeno de participación masiva de todos los ciudadanos en la producción de dicha información. Uno de los resultados ha sido la aparición del fenómeno mal llamado de la desinformación. La revolución digital, por lo tanto, ha hecho y hará crecer exponencialmente las capacidades narrativas o contranarrativas con fines políticos de distintos actores, aunque también aumentarán en número y sofisticación el conjunto de ciberataques. La dilución de las fronteras y los espacios geográficos a favor del ciberespacio propone un desafío para los geógrafos. En este documento se esbozará a través de dos casos prácticos y el uso de herramientas de recolección y representación de cartografía del ciberespacio la transformación del fenómeno digital a través de las redes sociales y su lazo innegable con la desinformación.

La hipótesis que planteamos es que existe un sustrato social y territorial receptivo a determinados contenidos

prorrusos, como algunos sectores independentistas vascos y la extrema izquierda española en todas sus variantes lingüísticas, algunos de ellos identificados en espacios geográficos concretos, todo ello enmarcado en el contexto de la guerra en Ucrania.

2. METODOLOGÍA

El método de análisis utilizado parte del enfoque de la disciplina de la geopolítica crítica francesa. Este enfoque pone especial hincapié en el uso de representaciones como elementos básicos para comprender la visión o perspectiva de los distintos actores, particularmente de representaciones geopolíticas como el ciberespacio. Además, este enfoque entiende la geopolítica como el conjunto de rivalidades de poder entre actores que mantienen una representación propia del territorio en el cual se encuentran y en el que pretenden ejercer su influencia (Loyer, 2019).

Para la recopilación de los datos necesarios para este estudio se han utilizado herramientas suministradas por la plataforma Crystal del Centro de Geopolítica de la Dataesfera (GEODE) del Institut Français de Géopolitique (IFG) en París, siendo Cassini la entidad privada oficial (Startup/Spin Off). La selección de canales para fundamentar el análisis recayó en cuentas asociadas a la Izquierda Abertzale. Inicialmente, se realizó una primera recolección de datos a través de la API de Telegram de la plataforma Crystal a partir de algunas cuentas vinculadas a la Izquierda Abertzale, por constituir un espacio geográfico más reducido y, por lo tanto, la base de datos resultante sería “controlable”. Para ello, se realiza una primera inspección de cuentas que siguen al canal de EH Donbass, un canal que difunde contenido prorruso en el País Vasco. A través de la API, se recuperan las interacciones (mensajes intercambiados). No se establecieron límites temporales de recogida, aunque si se limitó en 1.000 los mensajes analizados por el canal para establecer un límite lógico que terminó por recoger datos de los dos últimos años (desde principios de 2022 hasta finales de 2023). Este procedimiento nos proporcionó una base de datos de 4.747 entradas de canales y usuarios de Telegram, lo que nos permitió realizar una valoración precisa de la estructura relacional de la Izquierda Abertzale.

La representación cartográfica resultante (grafo) se realiza utilizando la distribución algorítmica Force Atlas 2 sobre los datos, empleando el programa Gephi. Este algoritmo permite distribuir los nodos en función de la calidad de sus relaciones, lo que implica que los actores (nodos) con mayor heterogeneidad de relaciones (aristas) ocupan una posición central, mientras que aquellos con un volumen de relaciones menos heterogéneo tienden a situarse en posiciones más descentralizadas dentro del grafo. Asimismo, se aplica el algoritmo Modularity Class, que permite clasificar las comunidades de acuerdo con la solidez de sus vínculos, es decir, comunidades que mantienen relaciones más estrechas. Todo esto permite estructurar los espacios de determinadas comunidades, que a menudo se diferencian por ideología o lengua, por lo que se llevará a cabo un análisis topológico del grafo resultante.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Primeramente, profundizaremos en el desarrollo de la revolución digital y sus consecuencias en el análisis geográfico y geopolítico, y cómo las herramientas de representación del ciberespacio, aunque a priori parezca lo contrario, no rompen con la territorialidad. Seguidamente, abordaremos el caso práctico del ciberespacio vasco dibujando las comunidades que tanto producen contenido desinformativo como las agentes exteriores, además de averiguar las comunidades receptivas locales y las que vehiculan y diseminan contenidos desinformativos.

3.1. La adaptación de la geopolítica a la revolución digital y al fenómeno de la desinformación.

La revolución digital, con la aparición de las redes de comunicación e información de Internet y las redes sociales o, más recientemente, la explosión de la IA, está modificando y modificará las relaciones que tenemos con la información, lo que implica también a todas las ciencias y disciplinas. Si antiguamente la imprenta facilitó la difusión de nuevas ideas rompiendo el monopolio del saber de la Iglesia en Europa con la Reforma protestante, donde se nutrieron también los proto nacionalismos, las redes sociales y la IA también romperán con las anteriores lógicas informativas, mucho más jerarquizadas a través de instituciones de conocimiento e información como la academia, medios de comunicación e instituciones gubernamentales (A. Kissinger H., Schmidt E., Huttenlocher D., 2021).

Para empezar, cabe mencionar los efectos que implican la aplicación de estas tecnologías digitales en la geografía o geopolítica. Así pues, la revolución digital, como en su momento la telefonía, permite romper con la barrera espacio-tiempo. Aunque esto conlleva primeramente la construcción de infraestructuras para sustentar y crear este espacio digital que evidentemente tiene sus claros lazos con el territorio. Las infraestructuras de Internet, compuestas particularmente por computadoras, centros de datos (servidores) y sus

cables que las conectan, mantienen una firme y sólida conexión con la geografía. Así, al constituirse en forma de telaraña con sus aristas y nodos, Internet debe ubicar en determinados sitios los servidores y los cables para que fluya la información. Como sucede con las infraestructuras terrestres, se suelen escoger esas zonas donde su paso sea más eficiente y permita un menor costo económico, pero que al mismo tiempo reduzca al máximo la distancia del desplazamiento de los datos. Además, esto mantiene claras implicaciones geopolíticas respecto a la soberanía digital, sobre todo si hablamos del control de los pasos de los cables de Internet y del mantenimiento de los centros de datos o servidores en un territorio u otro.

No obstante, el concepto de soberanía aparece como algo problemático cuando ya hablamos del ciberespacio, entendido este como un nuevo espacio “intangible dentro del cual operan los intercambios desterritorializados entre ciudadanos de todas las naciones a una velocidad instantánea que rompe toda noción de distancia” (Douzet, 2014). Este espacio, alejado de lo territorial, mantiene lógicas aplicables desde la óptica de la geopolítica, y por lo tanto, no podemos desligarla por completo de la cuestión territorial, puesto que las pugnas de poder no solo se manifiestan en el ciberespacio, sino que también mantienen su traslación directa con el territorio, como veremos más adelante.

Así pues, la lógica territorial se desvanece considerablemente desde el punto de vista de la transferencia de datos y comunicación, aunque esa ruptura del espacio-tiempo tiene sus consecuencias claras en el territorio. La cartografía del ciberespacio que vamos a desarrollar arrojará luz sobre los comportamientos de las redes sociales, particularmente en la radicalización y polarización actual, fruto parcialmente de la revolución digital y la generación del fenómeno de la desinformación. La comprensión del ciberespacio por diferentes actores como un campo de batalla, como puede ser Rusia y algunos de sus aliados, en contra de un campo de información “libre y democrático” que hasta la fecha imperaba en el pensamiento de muchas de las sociedades de los estados dichos democráticos, reconfigura este espacio y le otorga un componente geopolítico trascendental, particularmente en su traslación en el comportamiento de los ciudadanos en el marco de las democracias.

3.2. Cartografía del ciberespacio de la Izquierda Abertzale

El análisis relacional de los canales de Telegram y sus usuarios confirma la hipótesis inicial sobre la permeabilidad de las narrativas prorrusas en los grupos de interés de la extrema izquierda independentista vasca. Las comunidades lingüísticas castellana, vasca, catalana y la comunidad latina forman parte de la composición del grafo, aunque proporciona información adicional. Dentro de la comunidad de la extrema izquierda vasca y española, se observa una penetración significativa de actores internacionales vinculados, ya sea a la propaganda prorrusa o de sus aliados como Irán o Corea del Norte. El algoritmo sitúa a EH Donbass (ONG prorrusa vasca) dentro del grupo de medios prorrusos (comunidad amarilla), a pesar de formar parte en el grafo de la comunidad de la Izquierda abertzale, donde se encuentran los canales de Telegram de la formación política abertzale de EH Bildu, que aglutina sectores como Sortu y Ernai Gatze (presentes en el grafo). Esto se explica porque EH Donbass mantiene vínculos con medios prorrusos, mientras que opera en el contexto de la Izquierda abertzale, lo que apunta a una interconexión interesante entre estos actores. Las comunidades identificadas por el algoritmo se dividen en cuatro grupos (verde, amarillo, rojo y morado).

La comunidad verde representa la base de la cual se ha originado el estudio, es decir, los grupos de interés vascos, y está claramente definida. Dentro de los actores de la comunidad amarilla (ubicada en la parte superior del grafo, entre las comunidades vasca y catalana) hemos identificado diversos actores, además de EH Donbass. Entre ellos se incluyen medios de comunicación y sitios web dedicados a la difusión de propaganda, principalmente de estados aliados de Rusia como Irán o Corea del Norte. También se observa la presencia de un canal en español vinculado y dedicado a la difusión del grupo Hezbolá con un marcado contenido prorruso.

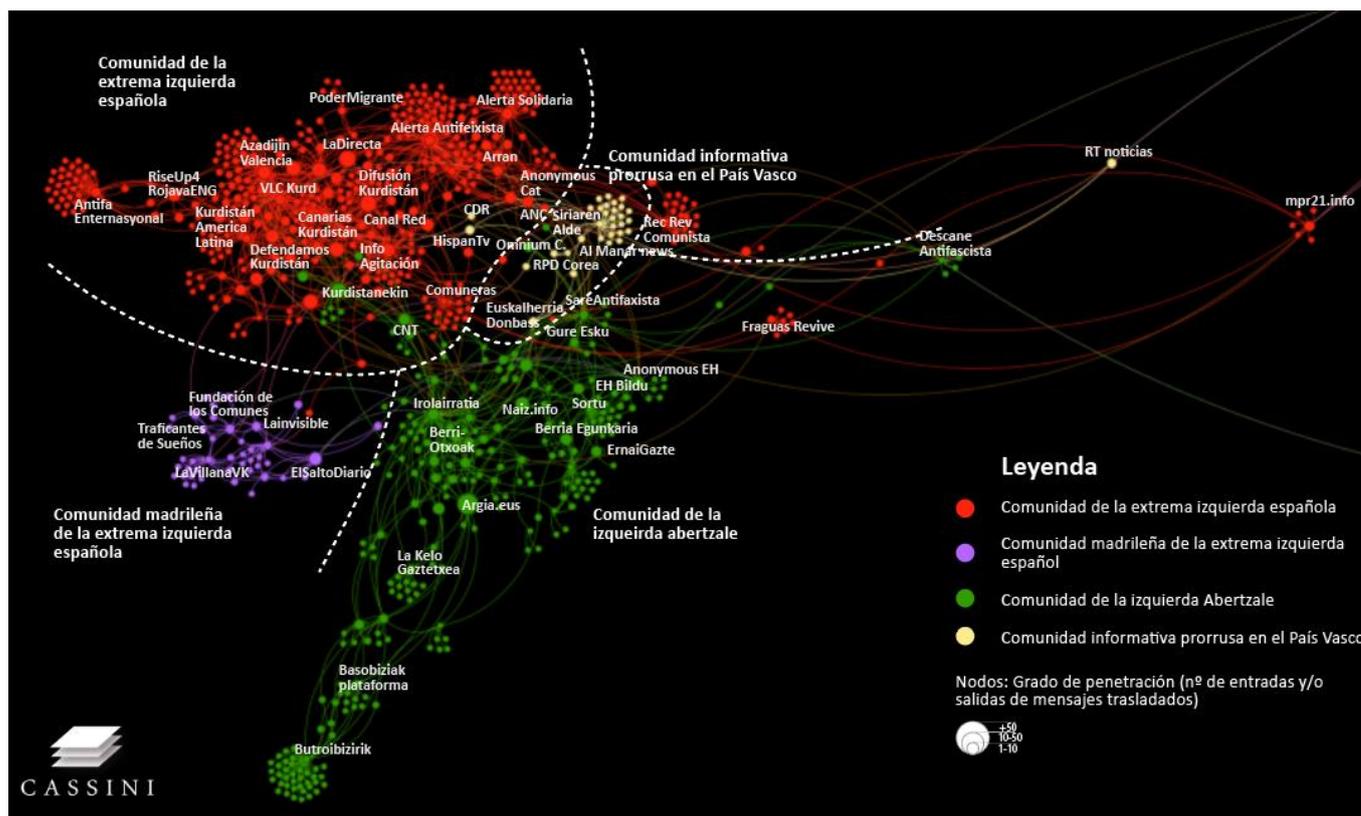


Figura 1: Gráfico relacional de las interconexiones de canales Telegram vascos ligadas a narrativas prorrusas en el ciberespacio vasco y español

Como principales actores encontramos a Rusia Today Noticias (RT Noticias), conocido canal de difusión de noticias financiado por el Estado ruso. Sus emisiones fueron bloqueadas por la UE tras la invasión rusa en Ucrania en febrero de 2022, por eso no se perciben muchas interconexiones. Por otra parte, encontramos a la Asociación de Amistad con la República Popular Democrática de Corea Euskal Herria (RPD Corea EH) vinculada a la acción exterior de ‘Corea del Norte’. Seguidamente encontramos el conocido canal Hispan TV, canal público iraní en español. Posteriormente, encontramos el canal Al-Manar, una televisión por satélite vinculada a Hezbolá, que retransmite en español desde Beirut (Líbano) con una variada programación. También vinculado a la comunidad amarilla encontramos a Al Mayadeen de línea panárabe que retransmite en español con una programación de 24h. Por su parte, encontramos a Siriarenalde, se trata de una plataforma de extrema izquierda vasca que da una especial cobertura al conflicto siriano.

A pesar de que esta comunidad de actores prorrusos y/o antioccidentales no presenta un alto nivel de interacción en términos de menciones o citaciones, con la excepción de Siriarenalde, un canal de Telegram vasco con una comunidad significativa a su alrededor, sí ocupan una posición central entre las comunidades. Además, como intentaremos explicar, los contenidos fluyen, aunque se diluyen en el conjunto de grupos de interés de la izquierda. Por ejemplo, dentro de la comunidad vasca, se incluyen sectores políticos importantes de la Izquierda abertzale, como EH Bildu, una formación que aglutina a diversos sectores de la Izquierda abertzale y que aparece citada en el esquema. Además, sectores radicales de esta misma formación política, heredera del brazo armado de ETA, como Sortu (heredera de Batasuna) y Ernai Gatze (organización juvenil de Sortu), también están presentes. A pesar de que las cuentas oficiales no comparten contenido directo prorruso, sí tienen un peso relevante en términos de interacciones. Sortu y Ernai Gatze mantienen una posición más influyente en el grafo en comparación con EH Bildu (que tiene una posición más central), y cuentan con un mayor número de interrelaciones. Esto sugiere que los sectores más radicales dentro de EH Bildu tienen una presencia más fuerte en el grafo y mayor cercanía a EH Donbass.

EH Donbass, por su parte, interactúa especialmente con los actores mencionados de la comunidad amarilla. Además de ser citado por actores como RPD Corea o Al-manar, el grupo de Telegram EH Donbass cita a dos grupos vinculados a espacios geográficos específicos: Irolairratia y Berri_Otxoak1992. También cita la plataforma no identificada a un territorio, Sare Antifaxista Euskal Herria perteneciente a la red de Plataformas Antifascistas. La primera corresponde a una radio de “izquierda alternativa”, vinculada a una asociación de vecinos en el céntrico barrio de Bilbao, Irala. La segunda es un canal que representa a un colectivo

autoorganizado y social de extrema izquierda de Baracaldo (1992), ciudad portuaria al lado de Bilbao, que trabaja realizando acción social, aunque fue creado para abordar problemas de vivienda. Ambas ocupan una posición central en el grafo, mostrando una fuerte diversidad en sus interacciones con otros actores. La Plataforma Antifascista de Euskal Herria forma parte de la red global antifascista. En definitiva, estos canales mencionados aparentemente mantienen una cierta cercanía con el grupo de EH Donbass.

A continuación, encontramos la comunidad roja en la (parte superior del grafo), que incluye canales de grupos antifascistas y canales relacionados con la defensa de pueblos sin estado, con una fuerte difusión de contenidos. La comunidad roja es la más dinámica del grafo y se presencian diversos subgrupos, como el catalán, valenciano, canario y latino. Es una comunidad que concentra muchas interacciones. En el laboratorio de datos, el canal "Canarias con Kurdistán" ocupa el primer lugar, con un total de 994 menciones, seguido de cerca por el canal catalán de alertas "Alerta Antifeixista" que tiene vínculos cercanos con la CUP (extrema izquierda independentista catalana) y cuenta con 889 menciones. Otros canales de difusión importantes como Difusión Kurdistán (930 menciones), InfoAgitación (759), etc. Destaca por el lado abertzale, Sareherritarra (833) plataforma vinculada a demandas importantes de la Izquierda abertzale en defensa de los "prisioneros, exiliados y deportados vascos", prisioneros vinculados normalmente a la participación con la banda armada ETA.

Por otra parte, en la comunidad roja apreciamos la presencia de otro canal relevante de difusión de contenidos Canal Red, la plataforma mediática de la extrema izquierda dirigida por Pablo Iglesias. La empresa pertenece al conocido empresario "trotskista" Jaume Roures, quien hasta hace poco fue CEO de la multinacional Mediapro, y es fundador del diario de extrema izquierda Público (que aparece en ambos grafos). De los mencionados, nos gustaría destacar el sindicato de la CNT, de carácter anarquista, ocupa una posición central en todo el grafo. Esto sugiere que es un actor relevante debido a la diversidad de interacciones, además de servir como puente entre las diferentes comunidades. La CNT es una corriente anarcosindicalista de organización obrera nacida en Barcelona, con mucho seguimiento principios del siglo XX en España. Todos estos actores y plataformas desempeñan un papel crucial en la difusión de información y narrativas dentro de la comunidad de la extrema izquierda en España y que estarán presentes en el marco catalán.

En definitiva, la comunidad amarilla, compuesta mayoritariamente por medios de difusión de contenido, actúa como fuente y conexión entre las dos comunidades principales: la comunidad roja, asociada a la extrema izquierda española en todas sus variantes lingüísticas, y la comunidad verde, vinculada a la izquierda abertzale. Podemos apreciar la representación de territorios específicos que corresponden a diferentes conjuntos espaciales configurados por las comunidades española incluyendo Cataluña (roja) y una configurada por la comunidad vasca. Además, se aprecia el sector madrileño de la extrema izquierda. En definitiva, a pesar de tener pocas interacciones, la comunidad amarilla cumple un papel de conector entre comunidades, especialmente a través de EH Donbass. Se observa también que la comunidad roja muestra un mayor dinamismo que la verde, probablemente debido a diferencias evidentes en el volumen poblacional.

4. CONCLUSIONES

En definitiva, se ha podido identificar cómo la guerra informativa prorrusa tiene una clara incidencia en el ciberespacio vasco, aunque también en el resto del estado, especialmente dentro de la extrema izquierda. A pesar de existir esta incidencia, los contenidos se diluyen en el ciberespacio atendiendo a la existencia de actores autóctonos de producción de contenido como Argia. Se ha detectado como los sectores más radicales de la izquierda abertzale, como Sortu o Ernai Gatze (vinculados a EHBildu) son los grupos más cercanos a la comunidad de contenido prorruso o antioccidental. Asimismo, se ha podido identificar cómo incluso existen determinadas comunidades ocupando espacios geográficos concretos que se ven nutridas por esta desinformación, muchas de ellas de estratos sociales populares, como en el caso de Bilbao, o que forman parte de colectivos o plataformas locales de reivindicaciones sociales y políticas de izquierdas o extrema izquierda. También se ha podido apreciar cómo estas campañas de desinformación o de guerra informativa pueden llegar e incidir en la opinión pública en determinados momentos, como en el caso de la invasión de Ucrania (2022-), demostrando de esta manera la incidencia territorial, pero también de polarización y radicalización de las sociedades. Todo ello no responde únicamente a la posición activa de los canales prorrusos para generar contranarrativas y radicalización, sino también a un sustrato local propicio a determinados relatos. A pesar de todo ello, el volumen de interacciones recogidas de los canales prorrusos en Telegram no responde a un volumen desorbitado cosa que da a entender unos ciertos límites en su incidencia territorial, social y política en el País Vasco.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Colectivo (2014). *Cyberespace: enjeux géopolitiques*. Hérodote. Revue de géographie et de géopolitique. N152-153. París, Editions La Découverte.
- Colectivo (2020). *Géopolitique de la Datasphère*. Hérodote. Revue de Géographie et de géopolitique. N.177-178. París, Editions La Découverte.
- A. Kissinger H., Schmidt E., Huttenlocher D (2021). *La Era de la Inteligencia Artificial y nuestro futuro humano*. Anaya.
- Habermas J. (1991). *The Structural Transformation of the Public Sphere. An Inquiry Into a Category of Bourgeois Society*. Cambridge, MIT Press.
- Gorwa R., Smeets M. (2019). "Cyber conflict in political science: a review of methods and literature", presentación en la Convención anual de ISA 2019, Toronto.
- Keenkler Y., Faris R. Et Roberts H. (2018). *Network propaganda. Manipulation, Disinformation, and Radicalization in American Politics*. New York, Oxford University Press.

Patrones espaciales intraurbanos más allá de la sección censal: metodología SIG para la desagregación armonizada por edificio de población vinculada en viviendas secundarias

O. De Cos Guerra¹

¹Departamento de Geografía, Urbanismo y Ordenación del Territorio, Universidad de Cantabria. Avda. Los Castros, s/n 39005 Santander (Cantabria). Grupo de investigación UC Espacios y Territorio: Análisis y Ordenación (ETAO). Grupo de investigación de Economía de la Salud, Instituto de Investigación Sanitaria Valdecilla (DIVAL), Santander (Cantabria).

olga.decos@unican.es, <https://orcid.org/0000-0002-2245-5378>

RESUMEN: La toma de decisiones en el territorio a nivel de detalle con frecuencia debe afrontar las dificultades de acceso y modelización de datos demográficos por debajo de la sección censal, unidad de desagregación más habitual para la difusión de datos estadísticos en España. Este hecho es especialmente problemático en territorios con una elevada población estacional vinculada por segunda residencia. En este estudio se tienen en cuenta las particularidades de los municipios en los que confluyen dos características: un bajo o modesto volumen de población residente que conlleva una escasa desagregación espacial de datos censales y un elevado volumen de viviendas de segunda residencia que implican un destacado y recurrente incremento poblacional estacional.

Se propone una afinada metodología SIG de desagregación capaz de estimar el volumen de población residente y vinculada por segunda residencia a nivel de edificio, manteniendo una armonización constante con los datos agregados procedentes de estadísticas oficiales. La metodología planteada se basa en datos abiertos del Instituto Nacional de Estadística, como la malla censal de 1 km², y en la base de edificios de Catastro (Ministerio de Hacienda, Gobierno de España). Se toma como caso de estudio municipio de Noja (Cantabria, España) -con 1.000 viviendas principales y cerca de 11.000 secundarias-; si bien, esta metodología es exportable y replicable. El estudio concluye con un análisis estadístico de patrones espaciales que revela los matices espaciales de distribución de la población residente y vinculada por segunda residencia.

Palabras-clave: catastro, censo, patrón espacial, estadística espacial.

1. INTRODUCCIÓN

Los análisis geo-demográficos a nivel intraurbano con frecuencia se encuentran condicionados por la disponibilidad de fuentes estadísticas y cartográficas con una resolución espacial y temporal adecuadas. Centrándonos en el abordaje espacial, los datos se suelen acceder agregados en base a unidades que cuentan con escasa significación, como las secciones censales, en cuya definición y delimitación va implícito el volumen de población residente. Las secciones cuentan con otras limitaciones ampliamente documentadas en estudios SIG, como la nula expresividad en cuanto al contenido social o demográfico que encierra cada perímetro censal, los dispares tamaños ante la existencia de áreas ocupadas en continuidad frente a ámbitos dispersos, o el conocido problema de la unidad espacial modificable (UEM) que llevó a Gálvez et al. (2013) a plantear una metodología alternativa para la elaboración de unidades espaciales que fueran modificables según edificaciones residenciales a partir los datos de sección.

El estudio de la distribución de la población a partir de datos agregados puede llevar un sesgo asociado en su patrón espacial, tal como quedó de relieve durante la pandemia COVID-19 en la pauta de distribución del contagio y su relación con variables de contexto, algunas ampliamente discutidas, como la densidad, que según la escala y las entidades de agregación mostraba relaciones con la incidencia muy diferentes (Andrés et al., 2021; Bufalo & Rydzewski, 2021; De Cos et al., 2023).

No han faltado, en este contexto, estudios que hayan avanzado más allá de las limitaciones de fuentes oficiales agregadas; en unos casos -lo óptimo- mediante la geocodificación de microdatos (De Cos et al., 2021) y, en otros, mediante el desescalado de datos demográficos desde unidades agregadas, comúnmente las secciones censales, hasta el edificio, según consolidadas metodologías de desagregación o *downscaling* (Lwin

& Murayama, 2009; Gálvez et al., 2013; Mora y Martí, 2015; Santos-Preciado, 2015; De Cos y Usobiaga, 2019). Paralelamente, desde los organismos productores, y más concretamente desde el Instituto Nacional de Estadística (INE), se ha avanzado en unidades de agregación alternativas al seccionado, entre las que cobra especial importancia la malla de población de 1 km², conocida como *grid* censal, que cuenta con dos ventajas comparativas respecto al seccionado: la resolución espacial constante, con independencia del tipo de poblamiento o del volumen de población, y su continuidad invariable en el tiempo, que soluciona el anteriormente referido problema de la UEM.

El uso de la malla censal cuenta ya con una destacada trayectoria, si bien esta responde fundamentalmente a estudios a nivel nacional y regional (Gisbert y Martí, 2015; Goerlich y Cantarino, 2017; Gisbert, 2024). Menos habitual es contar con metodologías de análisis apoyadas en la malla censal a nivel intraurbano. Esto puede tener sentido ya que habitualmente el seccionado en áreas urbanas densas cuenta con una mayor desagregación espacial que la malla, aportando más unidades de análisis. Sin embargo, a esta pauta general existe una excepción para la cual recurrir a la malla censal resulta un enfoque novedoso, en el cual se centra la presente aportación.

Esta excepción se manifiesta en aquellos municipios que presentan dos características, cuales son: un bajo o modesto volumen de población residente que conlleva una escasa desagregación espacial de datos censales (pocas secciones) y un elevado volumen de viviendas de segunda residencia que conllevan un destacado incremento poblacional en ciertos momentos del año. Ya en 2011 el INE identificó 50 municipios con más 2.000 habitantes en los que más del 50% de sus viviendas eran secundarias. Entre estos, Noja (en la costa oriental de Cantabria) ocupaba la primera posición con más del 90% de viviendas secundarias, seguido de Daimús (Valencia) que no llega a los 3.500 habitantes y presenta más del 75% de viviendas secundarias, Llançà (Girona) con algo menos de 5.000 habitantes y cerca del 74% de viviendas secundarias, etc. Asimismo, la estadística experimental muestra en la fuente de Movilidad estacional (INE, 2019-2021) el destacado incremento de la población estacional en municipios como los señalados, con un aumento para la última fecha disponible (17 de julio de 2021) del 491,14% en Noja, 112,12% en Daimús o un 84,83% en Llançà.

En territorios de perfil similar a los señalados, el dimensionamiento de equipamientos y servicios y debe considerar el volumen de población residente estacional que se vincula recurrentemente a ese territorio por segunda residencia, reflejando un volumen de población estacional muy superior al dato censal de población residente. Esta población vinculada tiene un patrón espacial que -a pesar de ser fundamental para la planificación- con frecuencia se desconoce a nivel intraurbano.

A partir del patrón modelado de datos desagregados por edificio se abordan análisis exploratorios de estadística espacial que permiten medir la autocorrelación espacial, la centralidad y la dispersión de la población residente y vinculada por segunda residencia. Esto es ilustrativo de las áreas de concentración de demanda potencial de equipamientos y servicios a nivel de detalle. Asimismo, los resultados son expresivos de las pautas de distribución de la población para modelos de densidades focales kernel (Moreno, 1991; De Cos, 2004) susceptibles de ser incorporados en modelos de toma de decisiones, como la consolidada evaluación multicriterio con los principios de la lógica difusa. Este avance metodológico es especialmente importante en la consolidada línea de investigación que se desarrolla desde la Geografía en España sobre los procesos de distribución de la población a nivel intraurbano en destinos turísticos tensionados, donde con frecuencia se solapan procesos de gentrificación turística, turistificación y residencialización (Simancas et al., 2018; De la Calle, 2019; Barrero y Jover, 2021; Domínguez-Mújica et al., 2021).

2. FUENTES Y MÉTODOS

El estudio se basa en datos abiertos del INE, como la malla censal de 1 km², el Censo de Población y el Padrón Municipal de Habitantes. A pesar de encontrarnos en 2024 en un momento de cambios en el censo y el padrón, con la puesta en marcha del nuevo censo anual de población y la consecuente interrupción del padrón, hay que precisar que la metodología planteada es igualmente válida en este escenario cambiante. Por otro lado, se utiliza la base de edificios de Catastro del Ministerio de Hacienda (Gobierno de España).

La fuente cartográfica catastral (edificios) no sólo es fundamental por la componente espacial, sino también por la temática, y más concretamente porque aporta el dato de número de viviendas del edificio. Este campo es fundamental para desagregar la población de la unidad superior (celda de la malla censal actualizada al padrón del año que corresponda) en función del número de viviendas que tiene el edificio.

A partir de las fuentes señaladas, se propone una metodología afinada de desagregación SIG capaz de estimar el volumen de población residente y población vinculada por segunda residencia a nivel de edificio, manteniendo la armonización con los datos agregados procedentes de estadísticas oficiales. Con esto, la agregación de la población desescalada de todos los edificios que forman parte de la misma cuadrícula suman

el total de población de la cuadrícula. Así, el método de desescalado se basa en el dato conocido de viviendas totales del edificio, el número de viviendas principales (a nivel de cuadrícula) y secundarias (también a nivel de cuadrícula) aplicando a nivel de edificio el mismo porcentaje de la cuadrícula censal en la que cada edificio se localiza. El método de desescalado se desarrolla en 3 fases.

Fase 1: actualización de totales de población residente según proporcionalidad

La cuadrícula censal hasta 2021 cuenta con la periodicidad decenal característica del censo, antes de los nuevos cambios esperados, ya apuntados en la introducción; sin embargo, esta metodología es aplicable a años intercensales y, por tanto, orientados a desescalar población padronal. Para ello, se actualiza la población residente de cuadrículas (p_r) aplicando la proporción conocida en la fuente original en el año censal (t_0) para el año padronal (t_i) manteniendo la misma proporcionalidad (1):

$$p_r = p_0 / P_0 (P_r) \quad (1)$$

Siendo: p_0 población censal de la cuadrícula, P_0 población censal municipal y P_r población municipal en el tiempo i .

Fase 2: cálculo de la ratio de viviendas según uso en las cuadrículas para la armonización

Conocido el número de viviendas de las cuadrículas en el año censal (v_t), y su diferenciación según uso en principales (v_p) y secundarias (v_s) -no principales en la nomenclatura del último censo-, se obtiene la ratio de viviendas principales (2) y de viviendas secundarias (3) por cuadrícula.

$$r_p = v_p / v_t \quad (2)$$

$$r_s = v_s / v_t \quad (3)$$

Fase 3: desescalado de población residente y vinculada por segunda residencia en los edificios

En esta fase es fundamental el cálculo del número de viviendas por edificio a partir de la fuente de Catastro. Para obtener el número de viviendas es necesaria una depuración previa al desescalado:

- El enriquecimiento con la plantilla .CAT 13 aporta el año de construcción.
- Filtrado de los edificios que estuviesen contruidos en el año para el que se desea hacer el desescalado.
- Filtrado de los edificios que tienen al menos una vivienda.
- En las cuadrículas de borde entre municipios se eliminan las viviendas externas y se ajusta según proporcionalidad el dato original censal.

Posteriormente, a nivel de edificio se estima el número de viviendas principales (4) y secundarias (5) a partir del total (v_t) y de la ratio de ambos tipos de viviendas en la cuadrícula (r_p y r_s):

$$v_p = r_p * v_t \quad (4)$$

$$v_s = r_s * v_t \quad (5)$$

Conocida la población residente de la cuadrícula (P_r), las viviendas principales de la cuadrícula (V_p) y las viviendas principales del edificio (v_p), se desescala la población residente (p_r) en cada edificio (6):

$$p_r = v_p * \left(\frac{P_r}{V_p} \right) \quad (6)$$

La población vinculada en viviendas secundarias se estima multiplicando el número de viviendas secundarias del edificio (v_s) por un coeficiente de población que puede adaptarse según la finalidad y el caso de estudio; por ejemplo, ajustado a personas por vivienda según alguna normativa sectorial o, en su defecto, el tamaño medio del hogar, la ratio de personas por vivienda de la cuadrícula, etc. En el caso de Noja, se aplica el coeficiente de 3 personas por vivienda, establecido la Ley 7/2001, de Ordenación Farmacéutica de Cantabria, que es el marco normativo de este análisis.

3. EL MUNICIPIO DE NOJA COMO CASO DE ESTUDIO

El municipio de Noja, de unos 9 km² de superficie se sitúa en la comarca costera oriental de la Comunidad Autónoma de Cantabria. Los datos censales indican un volumen de población residente inferior a 3.000

habitantes (2.637 residentes en viviendas familiares, según el Censo de 2021) con un detalle inframunicipal de solo dos secciones censales y -según el Nomenclátor- un solo núcleo de población. La población residente habita 1.000 viviendas principales; sin embargo, el municipio cuenta con más de 10.000 viviendas secundarias, lo que hace que su población estacional tenga un destacado peso e importancia en la ocupación del territorio y en el uso de sus equipamientos y servicios.

Frente al seccionado, la malla censal organiza el municipio de Noja en 15 cuadrículas (Figura 1), de las cuales 4 son compartidas con el municipio colindante de Arnuero, por lo que sus datos se ajustan siguiendo la fase 3 anteriormente presentada en el apartado metodológico.

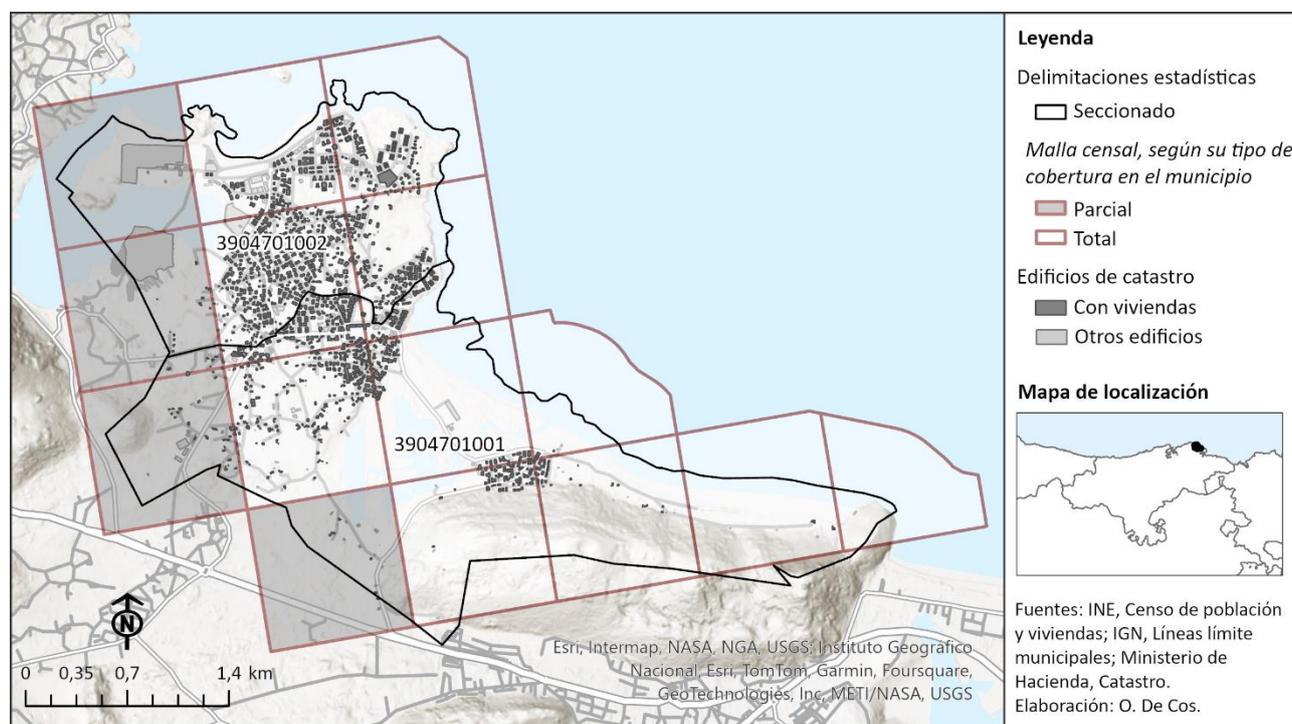


Figura 44. Mapa de organización de las unidades estadísticas en el municipio de Noja.

4. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

El Índice Global de Moran demuestra que la población residente y la vinculada tienen una pauta de distribución no aleatoria y agrupada ($z > 2,58$) con una probabilidad inferior al 1% de que ese patrón sea aleatorio ($p < 0,01$), al igual que las viviendas principales y secundarias (Tabla 1). Además, la población residente tiene una mayor concentración que la vinculada por segunda residencia (con mayor puntuación z) y está más agrupada que lo que correspondería según la distribución de las viviendas principales, siendo la puntuación z mayor en la población residente que en las viviendas principales (11,8758 frente a 10,0618).

Tabla 1. Índice Global de Moran del volumen de población y las viviendas a nivel de edificio

ÍNDICE GLOBAL DE MORAN	Viviendas principales	Viviendas secundarias	Población residente	Población vinculada
Puntuación z	10,061874	10,729764	11,875862	10,710483
Valor p	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01

La distribución de la población a nivel de edificio revela a nivel intraurbano la diferencia de magnitud entre la población residente y la vinculada por segunda residencia; además de una distribución de la población residente en edificios del núcleo inicial de Noja (Figura 2.A), frente a zonas de ocupación predominante estacional en el sector noreste (Figura 2.B) donde se han desarrollado diversas urbanizaciones desde los años 90. Asimismo, en el sector sureste, la zona urbana de Helguera es otro sector protagonista de la población vinculada por segunda residencia, al otro lado de las Marismas de Victoria -humedal incluido en el Lugar de Importancia Comunitaria de las Marismas de Santoña, Victoria y Joyel (ID: ES1300007, Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico)-. Este sector residencial se desarrolló fundamentalmente en los años 90 y primeros años del siglo XXI, con modalidad de viviendas en bloque.

Las elipses de desviación confirman una mayor concentración de la población residente, siendo los radios de su elipse de 512,99 m y 686,83 m, mientras que la elipse de dispersión de la población vinculada por segunda residencia alcanza los 540,09 m en su radio menor y 979,59 m en el radio mayor.

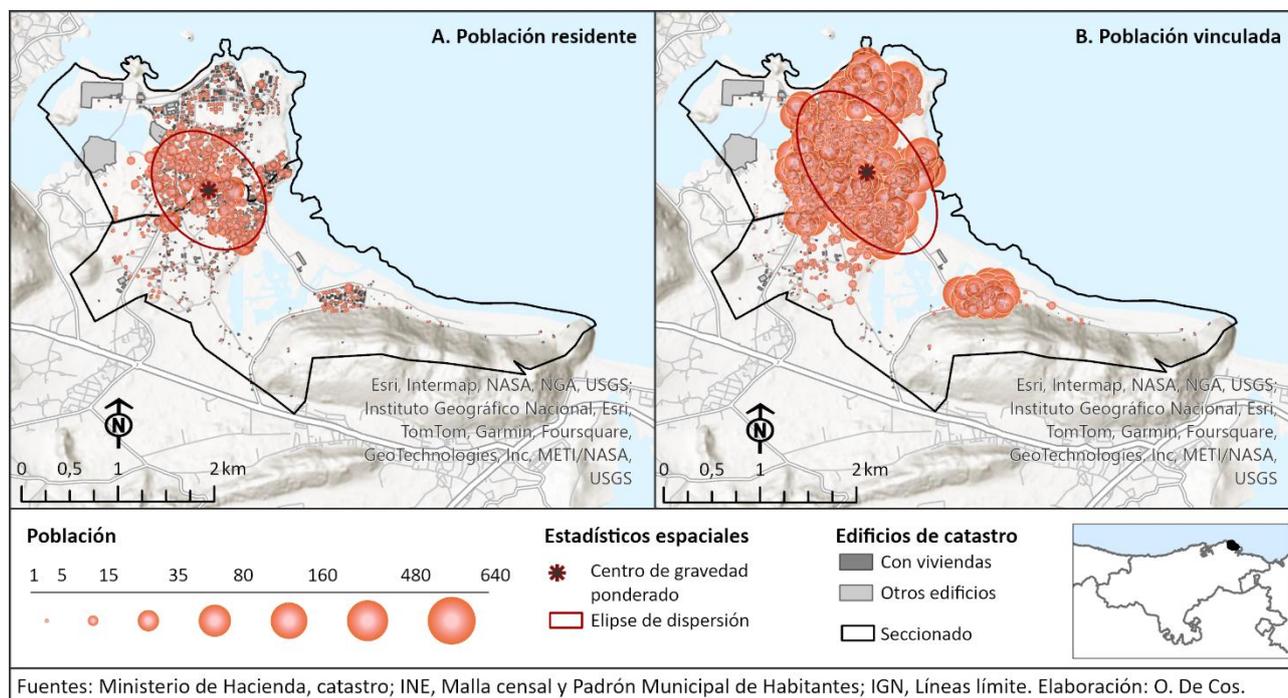


Figura 2. Mapa de población residente (A) y vinculada por segunda residencia (B) desescalada a nivel de edificio en el municipio de Noja.

Tal como muestra la Tabla 2, la elipse de dispersión de la población residente, que supone tan solo el 11,9% de la superficie municipal, concentra el 74,1% de la población residente, el 70,4% de las viviendas principales y el 53,9% de las viviendas secundarias. Por su parte, la elipse de desviación de la población vinculada por segunda residencia, que abarca el 17,9% de la superficie, concentra el 74,7% de las viviendas principales, el 66,6% de las viviendas secundarias y el 76,2% de la población residente.

Tabla 2. Población y viviendas dentro/fuera de las elipses de desviación estándar en el municipio de Noja

ELIPSES DE DESVIACIÓN ESTÁNDAR	Viviendas principales	Viviendas secundarias	Población residente	Área km ²
En la elipse de la población residente	704 (70,4%)	5.835 (53,9%)	1.918 (74,1%)	1,11 (11,9%)
En la elipse de la población vinculada	747 (74,7%)	7.206 (66,6%)	1.970 (76,2%)	1,66 (17,9%)

Fuentes: Ministerio de Hacienda, Catastro; INE, Padrón y Malla censal. Elaboración propia.

5. CONCLUSIONES

El estudio aporta una metodología exportable y basada en fuentes oficiales de acceso abierto para el todo el territorio de España. Asimismo, los resultados pueden ser actualizados gracias a la periodicidad de dominante anual en las fuentes incorporadas, y considerando que cabe esperar datos actualizados de viviendas cada 2-4 años en la modificación estadística realizada por el INE para el censo anual. Al margen de posibles sesgos en el modelo -como la consideración de la misma proporción de viviendas principales y secundarias en todos los edificios de una misma cuadrícula- el método planteado se propone como una forma de estimar el patrón espacial de distribución de la población no sólo residente sino también vinculada por segunda residencia; esto es, personas que recurrentemente hacen uso del territorio, sus equipamientos y servicios en distintos momentos del año. En municipios como Noja, donde la población vinculada por segunda residencia supera con mucho a la residente, conocer su pauta de distribución es esencial para una adecuada planificación, garantizando los principios de equidad y justicia espacial.

AGRADECIMIENTOS

Esta contribución forma parte de la investigación desarrollada en sendos proyectos de investigación

en la Universidad de Cantabria, de códigos: UC-4156 y P153 (AGME). Los análisis SIG han sido desarrollados con la Licencia ArcGIS Online del acuerdo de licencia campus Esri-Universidad de Cantabria.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Andrés G, Herrero D, Martínez M. Cartographies on COVID-19 and functional divisions of the territory: an analysis on the evolution of the pandemic based on Basic Health Areas (BHA) in Castile and Leon (Spain). *Boletín de la AGE*. 2021;91. <https://doi.org/10.21138/bage.3153>
- Barrero, M.; Jover, J. (2021): Paisajes de la turistificación: una aproximación metodológica a través del caso de Sevilla. *Cuadernos Geográficos*, 60(1),13-34. <https://doi.org/10.30827/cuadgeo.v60i1.13599>
- Bufalo L, Rydzewski A.L. Territorial dynamics of the COVID-19 pandemic in the province of Córdoba, Argentina. *Boletín de la AGE*, 91. <https://doi.org/10.21138/bage.3149>
- De Cos, O. (2004). Valoración del método de densidades focales (Kernel) para la identificación de los patrones espaciales de crecimiento de la población en España. *GeoFocus*, 4, 136-165.
- De Cos, O., Castillo, V., Cantarero, D. (2021). Differencing the Risk of Reiterative Spatial Incidence of COVID-19 Using Space–Time 3D Bins of Geocoded Daily Cases. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(261). <https://doi.org/10.3390/ijgi10040261>
- De Cos, O., Castillo, V., Cantarero, D. (2023). The Role of Functional Urban Areas in the Spread of COVID-19 Omicron (Northern Spain). *J Urban Health*, 100, 314-326. <https://doi.org/10.1007/s11524-023-00720-3>
- De Cos, O., Usobiaga, E. (2019). Retos metodológicos para estudiar la vulnerabilidad demográfica y residencial a nivel intraurbano ante los cambios en las fuentes estadísticas habituales. *Scripta Nova*, 23(606). <https://doi.org/10.1344/sn2019.23.21614>
- De la Calle Vaquero, M. (2019). Turistificación de centros urbanos: clarificando el debate. *Boletín de la AGE*, 83 (2829): 1-40. <https://doi.org/10.21138/bage.2829>
- Domínguez-Mújica, J., González-Pérez, J.M., Parreño-Castellano, J.M., Sánchez-Aguilera, D. (2021). Gentrification on the Move. New Dynamics in Spanish Mature Urban-Tourist Neighborhoods. *Urban Sci*, 5(33). <https://doi.org/10.3390/urbansci5010033>
- Gálvez, J.A., Fischer, J., Valenzuela, L.M. (2013). Metodología para la desagregación espacial de la información demográfica, en ámbitos urbanos, mediante la elaboración de unidades espaciales modificables. *GeoFocus*, 13: 337-366.
- Gisbert, F.J.G. (2024). *Censo 2021 versus Padrón 2021 –¡Y algunas otras cuestiones censales!–*. Instituto Valenciano de Investigaciones Económicas, SA (Ivie).
- Gisbert, F.J.G., Martí, I.C. (2015). *Census Grid 2011. Una evaluación metodológica*. Instituto Valenciano de Investigaciones Económicas, SA (Ivie).
- Goerlich-Gisbert, F., Cantarino-Martí, I. (2017). Grid poblacional 2011 para España. *Estudios Geográficos*, 78(282), 135-163. <https://doi.org/10.3989/estgeogr.201705>
- Lwin, K., Murayama, Y. (2009). A GIS Approach to Estimation of Building Population for Micro-spatial Analysis. *Transactions in GIS*, 13, 401-414.
- Mora, R.T., Martí, P. (2015): “Desagregación poblacional a partir de datos catastrales”. En J. De la Riva, P. Ibarra, R. Montorio, M. Rodrigues (Eds.), *Análisis espacial y representación geográfica: innovación y aplicación* (pp. 305-314), España: Universidad de Zaragoza-AGE.
- Moreno, A. (1991). Modelización cartográfica de densidades mediante estimadores Kernel. *Treballs de la Societat Catalana de Geografia*, 6 (30), 155-170.
- Santos-Preciado, J.M. (2015). La cartografía catastral y su utilización en la desagregación de la población. Aplicación al análisis de la distribución espacial de la población en el municipio de Leganés (Madrid). *Estudios Geográficos*, 76(278), 309-333. <https://doi.org/10.3989/estgeogr.201511>
- Simancas, M., Peñarrubia, M.P., Temes, R., Horcajada, T. (2018). La transformación de los destinos turísticos en ciudades: Análisis geodemográfico de las áreas turísticas de litoral de Canarias (España). *R. Estudios Regionales*, 112, 125-152.

Predicción de incendios forestales extremos mediante el acoplamiento de modelos de ignición y éxito del ataque inicial

M. Rodrigues Mimbbrero¹, P. Gelabert Vadillo², A. Jiménez Ruano³, F. Catello⁴

¹ Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio-GEOFOREST-IUCA Universidad de Zaragoza. C. Pedro Cerbuna 12, 50009 Zaragoza (Aragón).

² Departamento de Ciencia e Ingeniería Forestal y Agrícola. Universitat de Lleida. Av. Rovira Roure 191, 25197, Lleida (Catalunya).

³ Technosylva Inc, La Jolla, California, USA.

⁴ Forest Research Institute, University of the Sunshine Coast. Sippy Downs, Queensland 4556, Australia

rmarcos@unizar.es, <https://orcid.org/0000-0002-0477-0796>

perejoan.gelabert@udl.cat, <https://orcid.org/0000-0001-8020-4932>

ajimenez@tecnosylva.com, <https://orcid.org/0000-0001-7397-1818>

fdcatelo@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-1581-1019>

RESUMEN: El objetivo principal de este estudio es predecir condiciones extremas de incendios forestales proporcionando un producto que describa la probabilidad de que un incendio se inicie (por causa natural o antrópica) y escape a la contención. Para ello, hemos combinado modelos empíricos de probabilidad de ignición y capacidad de contención utilizando técnicas de aprendizaje artificial para calibrar modelos de regresión binaria. Se han combinado datos históricos de ignición de incendios forestales y capas geoespaciales que representan los principales factores de ignición y contención: accesibilidad, presión humana sobre las zonas forestales, humedad y disponibilidad del combustible. El enfoque se ha implementado a lo largo de la costa mediterránea de España. Nuestra estrategia persigue mejorar la capacidad de reducción del riesgo identificando las zonas prioritarias de intervención. Los resultados indican una buena capacidad predictiva en los modelos de ignición de incendio ($AUC > 0,80$), y una capacidad modesta, aunque suficiente, para evaluar la capacidad de contención ($AUC \approx 0,70$). La accesibilidad por carretera controla en gran medida el patrón espacial de ignición y contención, mientras que el contenido de humedad del combustible muerto modula el comportamiento temporal de probabilidad de ignición. Estos resultados se han utilizado para comprender la evolución futura del potencial de ocurrencia de incendios extremos (en escenarios SSP o *Shared Socioeconomic Pathways*) utilizando técnicas de cartografía temática.

Palabras-clave: incendios forestales, regímenes de incendios, ignición, contención, cambio global.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años la región mediterránea de la Unión Europea ha experimentado un aumento sin precedentes en el riesgo de incendios forestales y en la ocurrencia de incendios excepcionalmente grandes, extremos y dañinos (Molina-Terrén et al., 2019). La rápida expansión del interfaz urbano forestal (WUI por sus siglas en inglés), el cambio climático y una amplia variedad de cambios socioeconómicos, están favoreciendo la ocurrencia y propagación de incendios forestales con comportamiento extremo (Bar-Massada et al., 2023). En este contexto, la Comisión Europea ha puesto en marcha diversas iniciativas como el Mecanismo Europeo de Protección Civil o el Programa Horizonte Europa (2021-2027), ambos dirigidos, entre otras temáticas, al fomento de sociedades resilientes frente a desastres naturales, con especial énfasis en la mitigación del riesgo de incendio tras la devastadora ola de incendios de 2022. En este marco de actuación se apuesta por la prevención del riesgo apoyada en un mejor conocimiento de los factores y mecanismos relacionados con la ocurrencia de incendios extremos.

El presente trabajo aborda la caracterización de la susceptibilidad de ocurrencia de incendios extremos, es decir, aquellos con un alto potencial para escapar a la contención, de afectar a grandes superficies y causar daños sobre infraestructuras, ecosistemas, poblaciones y personas. El enfoque se basa en la integración de los componentes del "ciclo de vida del riesgo", es decir, un incendio que se inicia (ignición) y escapa al control (capacidad de extinción) se propaga por el territorio (propagación y comportamiento) dañando los bienes expuestos (exposición y riesgo). La aproximación planteada se basa en evaluar la probabilidad de que un incendio ocurra, tanto por causa natural como antrópica, y de que éste escape al ataque inicial de contención. Esta caracterización se lleva a cabo mediante la combinación de modelos empíricos para determinar la probabilidad de ocurrencia de incendios de origen antrópicos (Martín et al., 2019) y natural (Rodrigues et al., 2023), y combinarlos posteriormente con el éxito en el ataque inicial (Rodrigues et al., 2019). Estos modelos se desarrollan a partir de información geográfica relativa a la incidencia del fuego y a los factores que controlan la ignición y la capacidad de contención, por ejemplo, la accesibilidad, poblamiento y las interfaces urbano y agrícola-forestal, la humedad del combustible o la velocidad del viento.

2. METODOLOGÍA

2.1. Área de estudio

El área de estudio cubre el sector mediterráneo de la Península Ibérica, extendiéndose sobre las Comunidades Autónomas de Cataluña, Aragón, Comunidad Valenciana, Región de Murcia y la provincia de Albacete en Castilla la Mancha. Esta zona ha sido delimitada en el marco del proyecto FIREPATHS en el que se analiza la dinámica temporal del comportamiento del fuego en una muestra de grandes incendios ocurridos en el verano de 1994.

2.2. Fuentes de información

2.2.1. Información sobre la ocurrencia de incendios forestales

La fuente de datos primaria es la base de datos EGIF (Estadística General de Incendios Forestales), publicada y mantenida por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Esta base recopila información de los partes de incendio donde se recogen diversos datos de gran utilidad relacionados con la localización del origen de los incendios, su causa, los medios operativos desplegados o la superficie quemada (Mérida et al., 2007), entre otros. Esta información ha sido utilizada según el tipo de modelo a calibrar para la generación de una variable dependiente binaria. Por ejemplo, la fecha y localización del punto de ignición y su causa se han utilizado para calibrar los modelos de probabilidad de ignición, mientras que el tamaño del incendio ha servido además para caracterizar la capacidad de contención del fuego (Plucinski, 2012).

2.2.2. Estrategias de modelización

Para la modelización de la probabilidad de ignición por causa antrópica se ha desarrollado un modelo *ad hoc*, con resolución temporal diaria. Para ello se establecen como ignición (1-ocurrencia de un incendio) todos aquellos registros que presenten un área quemada de más de 5ha y cuya causa esté definida como antrópica (accidente, negligencia o incendios intencionados). Paralelamente, se establecen como no ignición (0-no ocurrencia), diversas muestras aleatorias con el mismo número de observaciones que la ignición. En este caso, las variables independientes explicativas del potencial de ignición son la distancia a la interfase urbano-forestal y a la interfase agrícola-forestal (ambas obtenidas mediante geoprocetos en entorno SIG a partir de Corine Land Cover 2012), la densidad de población (Gao y Pesaresi, 2021b, 2021a), los tipos de combustible (Aragoneses y Chuvieco, 2021) y la humedad del combustible fino muerto (Rodrigues et al., 2024). La probabilidad de ocurrencia de incendios naturales se ha obtenido a partir del modelo generado por Rodrigues et al. (2023). En el ejercicio de modelar las igniciones por rayo, se utilizan los registros de descargas nube-tierra sucedidos entre 2009 y 2015 (proporcionados por la Agencia Estatal de Meteorología y a través de la compañía Meteogrid S.L.), los cuales incluyen información sobre la intensidad, polaridad y densidad de las descargas. Utilizamos este conjunto de datos para identificar los rayos que provocaron incendios forestales, emparejándolos con las igniciones naturales del EGIF. Aquellos registros del EGIF cuya causalidad fue rayo y se pudieron emparejar con algún rayo nube-tierra registrado se codificaron como ignición por rayo (1), el resto de descargas se categorizaron como no ignición por rayo (0). Como variables predictoras se usó información sobre la topografía (elevación y curvatura del relieve), la altura de la vegetación (Simard et al., 2011), humedad del combustible fino muerto (Rodrigues et al., 2024) y de sequía estacional mediante el *Drought Code* del *Canadian Fire Weather Index* (Van Wagner, 1987; Viegas et al., 2001).

Para la modelización de la probabilidad de éxito en el ataque inicial se ha extendido a la zona de estudio el modelo desarrollado en Rodrigues et al. (2019). De forma resumida, se han establecido como ataques iniciales exitosos aquellas igniciones en las que el área quemada fue inferior 10 hectáreas (1) mientras que se consideraron incendios no contenidos aquellos que quemaron un área superior a 50 hectáreas (0). Como variables predictoras se usaron la visibilidad desde carreteras y núcleos de población, la distancia a carreteras, caminos y pistas, la distancia a helipuertos y aeródromos (variables obtenidas de la Base Topográfica Nacional 1:25.000), la altura de la vegetación (obtenida mediante tratamiento de datos LiDAR PNOA), la humedad del combustible fino muerto (Rodrigues et al., 2024) y la velocidad del viento (C3S, 2017).

2.2.3. Variables dinámicas en escenarios SSP

Los modelos nos permiten realizar predicciones probabilísticas para diferentes horizontes temporales y escenario. Las variables que se han considerado dinámicas en el tiempo han sido aquellas relacionadas con la densidad de población y el clima. Para realizar las proyecciones a futuro se recurrió a los Modelos de Circulación Global (GCM) a los que se les aplicó procedimiento de *downscaling*. Concretamente se usaron los modelos ACCESS-CM2, CanESM5, CNRM-ESM2-1, EC-EARTH3, MPI-ESM1-2-HR, MRI-ESM2-0 y las trayectorias socioeconómicas compartidas (*Shared Socioeconomic Pathways, SSP*; Riahi et al. 2017) 126, 245, 370 y 585 a resolución temporal diaria y 9x9km de resolución espacial. Para proyectar la densidad de población se ha recurrido a las proyecciones elaboradas por el *Socioeconomic Data and Applications Center* en los diferentes escenarios (Gao y Pesaresi, 2021b, 2021a).

2.3. Ajuste de modelos

La calibración de todos los modelos se basó en el algoritmo Random Forest (RF; Breiman, 2001), ajustado a partir de las variables dependientes binarias correspondientes, estimando la probabilidad de que cada una de las observaciones pertenezca a una de las categorías (0 o 1). RF requiere la configuración de varios hiperparámetros, como el número de predictores que se utilizarán en cada división en un árbol determinado (*mtry*), el número de árboles (*ntrees*) o el número mínimo de observaciones en los nodos finales (*min node size*). Estos parámetros se optimizaron durante la fase de calibración mediante una validación cruzada repetida 10 veces con 5 réplicas. Como medida de control de la precisión del modelo se calculó el Área Bajo la Curva ROC (AUC), que es un indicador de la capacidad de un modelo de discernir correctamente entre las dos categorías. Adicionalmente, se comprobó que los residuales del modelo no violaran el supuesto de autocorrelación espacial, garantizando así la independencia de las observaciones, la inexistencia de estructura espacial en el error, y la fiabilidad de las predicciones realizadas. Para garantizar la robustez y la estabilidad de los resultados, el proceso de modelado se repitió 100 veces mediante *bootstrapping*. Esta técnica consiste en generar múltiples muestras aleatorias de los datos y entrenar un modelo en cada una de ellas. El modelo final se seleccionó como aquel cuyo AUC estaba más cercano a la mediana de error según AUC de los modelos generados, asegurando así que el modelo final no esté sesgado por ninguna muestra particular y represente un rendimiento consistente a lo largo de múltiples iteraciones. Una vez seleccionado el modelo se predice para el momento actual y se proyecta a futuro utilizando los productos citados anteriormente. Como resultado también se derivó la importancia de las variables la cual se determinó mediante la medida de impureza de Gini. Todos estos procesos se han realizado utilizando el paquete *caret* (Kuhn, 2008) en entorno R (R Core Team, 2023). Todos los modelos se han espacializado a una resolución espacial de 250x250 metros para periodos anuales desde 2015 a 2100.

2.4. Espacialización y representación de los resultados

Las predicciones de los modelos se han sintetizado en series cartográficas en las que se ha agregado la información original en categorías representativas de la probabilidad de ignición, de contención y de la dominancia entre fuentes de ignición naturales y antrópicas. Cada uno de estos factores se ha codificado utilizando variables visuales (tono, gama de color y tamaño). La divergencia de color indica la dominancia de incendios según su origen antrópico (*ant*) o natural (*nat*). Los mapas de probabilidad se han reclasificado en 3 categorías usando intervalos regulares. A continuación, se han reclasificado para establecer la fuente de ignición dominante, obteniendo 4 categorías: (i) mayor probabilidad de incendio antrópico con contribución moderada de naturales, (ii) mayor probabilidad de incendio antrópico con escasa probabilidad de naturales, (iii) equilibrio en las fuentes de ignición y, (iv) moderada dominancia de incendios naturales. Estas 4 categorías se simbolizan con distinto tono en función de la capacidad de contención del fuego. Los tonos fríos indican alta capacidad de contención (probabilidad de contención $\geq 0,5$), y los cálidos menor capacidad ($< 0,5$). Finalmente, el tamaño del símbolo indica la probabilidad conjunta (*ant+nat*) de que ocurra un incendio. Se

han usado 3 clases de tamaño (cortes de intervalos en 0,33 y 0,66). Las categorías resultantes de la combinación de estos factores (Figura 1) facilitan la identificación de trayectorias de evolución, así como el diseño de actuaciones de prevención y mitigación del riesgo (Rodrigues et al., 2022).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados indican una buena capacidad predictiva en los modelos de ignición ($AUC > 0,80$ en ambos modelos) y modesta, aunque suficiente, para evaluar la capacidad de contención ($AUC \approx 0,70$). La accesibilidad por carretera controla en gran medida el patrón espacial de ignición y contención, mientras que el contenido de humedad del combustible muerto modula el comportamiento temporal de probabilidad de ignición. La susceptibilidad de ocurrencia de incendios extremos muestra un patrón espacial distintivo en los 3 componentes analizados. En el año 2015 (Figura 1A, resultados correspondientes al periodo de modelado) se aprecia una clara dominancia de los incendios por causa antrópica a lo largo de la costa y entorno a las principales áreas metropolitanas y ciudades del interior (ej., Zaragoza o Lleida), coincidiendo también con una mayor capacidad de contención del fuego facilitada por la alta accesibilidad de estas regiones. Los incendios naturales predominan en los Pirineos y en el Sistema Ibérico (Pineda et al., 2014; Rodrigues et al., 2023). Se observan agrupaciones de mayor probabilidad de incendio en la zona Central de Cataluña, el Área metropolitana de Valencia, Alicante y Murcia. Se identifican pequeños enclaves donde ésta alta probabilidad de ocurrencia de incendios coincide con menor capacidad de contención, principalmente en el extremo noroccidental de Cataluña (Vall d'Aran), Valencia y Albacete. En general, la situación inicial se caracteriza por un dominio antrópico en la configuración de la ocurrencia de incendios, pero con amplias zonas menos pobladas en el interior y en los sistemas montañosos, donde los incendios naturales predominan o, al menos, contribuyen en una proporción similar a los antrópicos.

La evolución de esta situación inicial depende en gran medida del escenario considerado (Figura 1B, 1C, 1D y 1E). En aquellos escenarios con donde la concentración de emisiones remite hasta final de siglo (SSP 126 y 245), la distribución espacial se asemeja razonablemente a la situación inicial, especialmente en el SSP126. Este itinerario lleva a una situación ideal en la que se consigue frenar en gran medida el calentamiento global y se reducen los desequilibrios socioeconómicos. En el caso del escenario SSP245, que conduce a un crecimiento moderado de la población y la concentración de emisiones de CO_2 se estabiliza en torno a 2025, se observa un leve aumento de la ignición antrópica acompañado de un ligero descenso de la capacidad de contención en las zonas más aisladas (provincia de Teruel y Pirineo aragonés). Este comportamiento se acentúa en el escenario SSP370 que prevé un aumento en la desigualdad y en la degradación ambiental con un aumento importante del aumento de emisiones y, por tanto, de la temperatura media global. El último de los escenarios escenifica la situación más desfavorable, orientado hacia el uso intensivo de combustibles fósiles y el crecimiento urbano y de la población. En este escenario la probabilidad de ignición aumenta en prácticamente toda la zona de estudio y los enclaves de menor capacidad de contención se expanden considerablemente, emergiendo nuevas zonas problemáticas en el área metropolitana de Zaragoza.

4. CONCLUSIONES

El presente trabajo presenta una estrategia para la evaluación del potencial de ocurrencia de incendios extremos. La aproximación planteada se basa en la combinación de modelos empíricos para evaluar la probabilidad de ocurrencia de incendios (tanto naturales como antrópicos) y la capacidad de contención. La accesibilidad por carretera se identifica como un factor clave en la distribución espacial tanto de la ignición como de la contención, mientras que el contenido de humedad del combustible muerto modula la probabilidad de ignición en el tiempo. Los incendios provocados por actividades humanas dominan en áreas urbanas y costeras, en contraste con las zonas montañosas, como los Pirineos y el Sistema Ibérico, donde prevalecen los incendios naturales. En ciertos enclaves, como Vall d'Aran, Valencia y Albacete, se observa una alta probabilidad de incendios junto a una baja capacidad de contención, lo que los convierte en áreas especialmente vulnerables. Bajo escenarios de reducción de emisiones, la distribución espacial de incendios se mantiene estable, pero en contextos de mayores emisiones y degradación ambiental, la probabilidad de incendios aumenta significativamente y las zonas con baja capacidad de contención se expanden. Esto sugiere que el cambio climático, junto con el uso intensivo de combustibles fósiles, incrementaría la frecuencia de incendios y dificultaría su control, especialmente en las áreas más afectadas.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido desarrollado en el marco de los proyectos FIREPATHS (PID2020-116556RA-I00; financiado por MCIN/AEI /10.13039/501100011033) y FireCycle (CNS2023-144228). Queremos expresar

nuestro agradecimiento a los Drs. Luís Torres y Jaime Ribalaygua de la empresa Meteogrid S.L., por proporcionar los datos climáticos y meteorológicos necesarios (proyecto FirEURisk, 101003890) y a la Dra. María Zúñiga por su ayuda y consejos sobre diseño cartográfico.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Aragoneses, E., y Chuvieco, E. (2021). Generation and Mapping of Fuel Types for Fire Risk Assessment. *Fire*, 4(59), 1-26. <https://doi.org/10.3390/fire4030059>
- Bar-Massada, A., Alcasena, F., Schug, F., y Radeloff, V. C. (2023). The wildland – urban interface in Europe: Spatial patterns and associations with socioeconomic and demographic variables. *Landscape and Urban Planning*, 235, 104759. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2023.104759>
- Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine Learning*, 45(1), 5-32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
- C3S. (2017). *ERA5: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate*. Copernicus Climate Change Service Climate Data Store (CDS).
- Gao, J., y Pesaresi, M. (2021a). Downscaling SSP-consistent global spatial urban land projections from 1/8-degree to 1-km resolution 2000–2100. *Scientific Data*, 8(1). <https://doi.org/10.1038/s41597-021-01052-0>
- Gao, J., y Pesaresi, M. (2021b). *Global 1-km Downscaled Urban Land Extent Projection and Base Year Grids by SSP Scenarios, 2000-2100*. Palisades, NY: NASA Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC). <https://doi.org/10.7927/1Z4R-EZ63>
- Kuhn, M. (2008). Building Predictive Models in R Using the caret Package. *Journal of Statistical Software, Articles*, 28(5), 1-26. <https://doi.org/10.18637/jss.v028.i05>
- Martín, Y., Zúñiga-Antón, M., y Rodrigues Mimbbrero, M. (2019). Modelling temporal variation of fire-occurrence towards the dynamic prediction of human wildfire ignition danger in northeast Spain. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 10(1), 385-411. <https://doi.org/10.1080/19475705.2018.1526219>
- Mérida, J. C., Primo, E., Cubo, J. E., y Parra, P. J. (2007). *Las Bases de Datos de Incendios Forestales como herramienta de planificación: Utilización en España por el Ministerio de Medio Ambiente*.
- Molina-Terrén, D. M., Xanthopoulos, G., Diakakis, M., Ribeiro, L., Caballero, D., Delogu, G. M., Viegas, D. X., Silva, C. A., y Cardil, A. (2019). Analysis of forest fire fatalities in Southern Europe: Spain, Portugal, Greece and Sardinia (Italy). *International Journal of Wildland Fire*, 28, 85-98. <https://doi.org/10.1071/wf18004>
- Pineda, N., Montanyà, J., y van der Velde, O. A. (2014). Characteristics of lightning related to wildfire ignitions in Catalonia. *Atmospheric Research*, 135-136, 380-387. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2012.07.011>
- Plucinski, M. P. (2012). Factors Affecting Containment Area and Time of Australian Forest Fires Featuring Aerial Suppression. *Forest Science*, 58(4), 390-398. <https://doi.org/10.5849/forsci.10-096>
- R Core Team. (2023). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>
- Riahi, K., Vuuren, D. P. van, Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B. C., Fujimori, S., Bauer, N., Calvin, K., Dellink, R., Fricko, O., Lutz, W., Popp, A., Cuaresma, J. C., KC, S., Leimbach, M., Jiang, L., Kram, T., Rao, S., Emmerling, J., ... Tavoni, M. (2017). The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global Environmental Change*, 42, 153-168. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>
- Rodrigues, M., Alcasena, F., y Vega-García, C. (2019). Modeling initial attack success of wildfire suppression in Catalonia, Spain. *Science of the Total Environment*, 666, 915-927. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.323>
- Rodrigues, M., Camprubí, À. C., Balaguer-Romano, R., Megía, C. J. C., Castañares, F., Ruffault, J., Fernandes, P. M., y Dios, V. R. de. (2023). Drivers and implications of the extreme 2022 wildfire season in Southwest Europe. *Science of The Total Environment*, 859, 160320. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160320>
- Rodrigues, M., Jiménez-Ruano, A., Gelabert, P. J., de Dios, V. R., Torres, L., Ribalaygua, J., y Vega-García, C. (2023). Modelling the daily probability of lightning-caused ignition in the Iberian Peninsula. *International Journal of Wildland Fire*. <https://doi.org/10.1071/WF22123>

- Rodrigues, M., Resco De Dios, V., Sil, Â., Cunill Camprubí, À., y Fernandes, P. M. (2024). VPD-based models of dead fine fuel moisture provide best estimates in a global dataset. *Agricultural and Forest Meteorology*, 346, 109868. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109868>
- Rodrigues, M., Zúñiga-Antón, M., Alcasena, F., Gelabert, P., y Vega-Garcia, C. (2022). Integrating geospatial wildfire models to delineate landscape management zones and inform decision-making in Mediterranean areas. *Safety Science*, 147, 105616. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105616>

Optimización en la toma de decisiones para la implantación de centrales de energía renovable en Andalucía: Diseño y desarrollo de un prototipo de software

G. Orozco Frutos¹, M. P. Díaz Cuevas²

¹ Departamento Geografía Física y AGR, Universidad Sevilla, C. Doña María de Padilla, 41004 Sevilla

² Departamento Geografía Física y AGR, Universidad Sevilla, C. Doña María de Padilla, 41004 Sevilla

¹ gorozco1@us.es, <https://orcid.org/0000-0003-3129-282X>

² pilard@us.es, <https://orcid.org/0000-0003-0846-9930>

RESUMEN: El proyecto Mapa de Potencialidad de Energías Renovables en Andalucía I (MAPER@I) plantea el desarrollo de modelos de localización óptima para la identificación de territorios aptos para la instalación de centrales de energía eólica y solar, considerando multitud de criterios y generando diferentes escenarios en función del grado de restricción a aplicar. Durante el proceso de ejecución de este proyecto ha surgido la necesidad de automatizar ciertas acciones referentes a la optimización del proceso de implementación del modelo en una base de datos *PostgreSQL/PostGIS*.

El trabajo que se presenta a continuación describe el proceso de desarrollo de un prototipo de software, que ayudará a la toma de decisiones para la localización óptima de estas infraestructuras energéticas. Se analizan las necesidades de automatización, así como los retos derivados de las tareas de codificación y gestión eficiente de las consultas SQL (Structure Query Language) para evitar redundancias y solapamientos en su ejecución, y el diseño de la User Experience/Interface (UX/UI) establecida para facilitar la operatividad a usuarios con conocimientos limitados en manejo de bases de datos, permitiendo así centrar los esfuerzos en la implementación efectiva del modelo.

Palabras-clave: Tecnologías de la Información Territorial, energías renovables, desarrollo de software, Andalucía, Modelo-Vista-Controlador

1. INTRODUCCIÓN

Los amplios objetivos dispuestos para los próximos años en materia de energía renovable, la conversión de estas infraestructuras como uso prioritario por parte de la UE (Directiva UE 2023/2413), la exigencia a los Estados miembros para que designen zonas de aceleración de las energías renovables a más tardar el 21 de febrero de 2026, o la designación de estas infraestructuras como de uso ordinario del medio rural en el caso de Andalucía en la Ley de Impulso a la Sostenibilidad Energética de Andalucía (Junta de Andalucía, 2021), justifican la necesidad de implementar modelos de localización óptima para la implantación de estas infraestructuras sobre el territorio.

Este trabajo presenta el diseño y desarrollo de un sistema de apoyo a la toma de decisiones espaciales (SDSS), un prototipo de software que permite el cálculo de diversas zonificaciones y escenarios de idoneidad para la instalación de centrales de energía eólica y solar en Andalucía, siguiendo en grandes líneas los modelos desarrollados por Díaz et al. (2021). Estos modelos se basan en la definición en primer lugar de zonas incompatibles, entendidas como aquellas en las que se incumplen criterios y restricciones determinados para proteger el patrimonio natural y cultural, a la población y garantizar la eficiencia energética. Posteriormente se calcula la idoneidad de las zonas catalogadas como compatibles, en función de una serie de factores de evaluación previamente definidos. En línea con Díaz et al. (2017) el prototipo de software a desarrollar debe posibilitar de manera eficiente la construcción de varios escenarios de idoneidad, constituyendo este una herramienta útil para planificadores y gestores en el camino hacia una transición energética inteligente.

2. PROCESO DE TRABAJO

El desarrollo de una herramienta software implica cumplir meticulosamente con una serie de pasos previamente planificados que ayuden al diseño e implementación de esta. Para ello, en un principio se defi-

nen una serie de objetivos y se establecen las pautas necesarias para obtener un software funcional y práctico.

2.1 Objetivos de la herramienta

- Acceso simplificado a datos complejos: Este software surge en el marco del proyecto *Mapa de potencialidad de energías renovables en Andalucía I* (MAPER@I), para el que se establece la necesidad de crear una base de datos *PostgreSQL/PostGIS* que permita a los usuarios implementar el modelo diseñado dentro de este proyecto. Para poder llevar a cabo consultas en la base de datos, es necesario utilizar lenguaje SQL entendiéndose desde un inicio que estas consultas podrían resultar complejas para investigadores profanos en la materia. Por ello, la herramienta tiene como principal objetivo, ser un intermediador entre el usuario que desee implementar y gestionar el modelo y la tecnología que hay detrás y que puede resultar compleja.
- Personalización y flexibilidad en la modelización: El estudio realizado por MAPER@I establece una serie de criterios con restricciones concretas sobre la red eléctrica, los núcleos de población, etc.. para la implantación de energía eólica y solar en Andalucía. La herramienta debe permitir que el usuario pueda definir sus propios parámetros/restricciones en base a las variables establecidas.
- Interfaz amigable y accesible: El diseño de la experiencia de usuario y la interfaz (UX/UI), debe ser intuitiva, eficaz y satisfactoria para el mismo. Al tratarse de un prototipo, es importante demostrar la potencialidad de este y su capacidad de facilitar un proceso, a priori complejo, al usuario.
- Integración de datos multifuentes: La herramienta debe permitir analizar el modelo en base a diferentes variables, que procederán de fuentes diferentes, por lo que se usará un formato estándar que permita compararlas. Esto se consigue mediante el uso de *PostgreSQL/PostGIS*, que exigirá que las variables se suban en un formato estándar y que puedan ser compartidos los resultados más adelante si se desea.
- Gestión de consultas en grandes volúmenes de datos: El principal desafío de esta herramienta es manejar eficientemente grandes volúmenes de información en consultas específicas. Esto implica un trabajo constante de búsqueda de la mejor solución, probando diferentes escenarios y escogiendo el más idóneo.

2.2 Fase de diseño

En esta fase se abordan dos tareas diferentes pero complementarias. Por una parte, se ha de diseñar el modelo, por otra, el diseño del software en base a los objetivos establecidos y a la dinámica necesaria para que el modelo pueda ser ejecutado por un usuario, esto implica la selección de tecnologías, el diseño de la base de datos, el diseño lógico de la herramienta y la propuesta estética de la interfaz.

2.2.1. Diseño del Modelo de Datos

Tras definir los requisitos esenciales, se procedió a la elaboración del diseño de la base de datos, que se implementó con el sistema de gestión de bases de datos espacial *PostgreSQL/PostGIS*.

El diseño de la base de datos se basó en un modelo entidad-relación de tipo araña, siguiendo lo dispuesto por Díaz et al. (2018), donde cada capa de información se gestionó como tabla independiente y con una entidad espacial central, concretamente una capa puntual con puntos cada 100 m. Esta tabla de puntos sirve como un nexo central en el que cada resultado del modelo se asocia a un punto específico, permitiendo una vinculación precisa y eficiente de los datos modelados con su ubicación geográfica correspondiente. Sobre esos puntos se han producido diversos procesos de indexación espacial, para acelerar tanto las consultas en la base de datos como la visualización.

Otra alternativa hubiera sido un sistema basado en capas ráster. No obstante, el análisis sobre datos ráster a gran escala puede resultar más complejo en términos de procesamiento y almacenamiento, al exigir el modelo multitud de variables, más los diferentes cálculos sobre estas, que implicarían una gran demanda de recursos (Gómez, 2020). Otro inconveniente es la menor flexibilidad de un sistema basado en ráster, modificar o añadir datos en un sistema de tablas suele ser más sencillo y menos costoso, ya que se pueden actualizar datos puntuales sin tener que rehacer toda la estructura de almacenamiento, al contrario que con los rasters que pueden requerir la reconfiguración de toda la capa. Respecto al modelo propuesto, este se basa en asignar a la capa de puntos cada 100 m el valor de cada una de las variables y restricciones consideradas. Estas han sido presentadas para su discusión en otra comunicación a este congreso y tienen como base los trabajos de Díaz (2013), Díaz et al. (2017) para eólica y Díaz et al. (2018) para solar. Las variables y las restricciones se corresponden generalmente con el establecimiento de distancias y rangos de valores que garanticen la protección de la población, la protección patrimonial y la eficiencia energética y territorial (cercanía a los núcleos de población, cercanía a la red eléctrica, espacios naturales protegidos, pendiente máxima, cumplimiento de servidumbres...). Cada punto obtiene un valor reclasificado entre 0 y 1, otorgando el

valor 0 a las zonas incompatibles y 1 a las compatibles en función de cada una de las variables y restricciones aplicadas. Posteriormente, mediante la multiplicación de los valores obtenidos se genera un solo mapa, donde cada uno de los puntos del territorio representa zonas compatibles/incompatibles.

Posteriormente los puntos catalogados como compatibles serán analizados en función de una serie de factores de evaluación (mayor presencia de recurso eólico y/o solar, mayor cercanía a la red eléctrica...). Estos factores serán ponderados e integrados, mediante la operación suma lineal ponderada, para obtener el mapa de idoneidad. Finalmente, la integración del mapa de idoneidad y de zonas incompatibles dará lugar al mapa de potencialidad.

2.2.2. Patrón de diseño y tecnología

Se optó por el modelo de arquitectura de software modelo-vista-controlador (MVC) para la estructura del programa. Este modelo facilita la organización del código en componentes independientes (ver Figura 1), promoviendo así una mayor modularidad, flexibilidad y facilidad de mantenimiento del código (Hernández, 2021).

Además, se hizo necesario implementar una tecnología que facilitara la integración del *backend* con el *frontend*. Por esta razón, se seleccionaron las tecnologías web (HTML, CSS, y *JavaScript*) junto con el lenguaje *PHP*, lo cual permitió la creación de un conjunto integral de funcionalidades que se alineaban con los objetivos del proyecto.

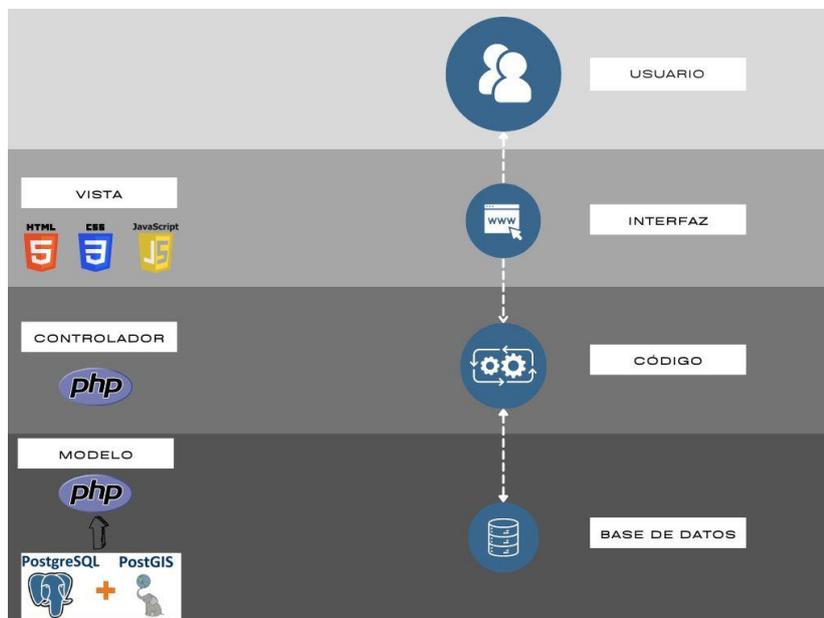


Figura 45. Arquitectura Modelo – Vista - Controlador

2.2.3. Diseño interfaz

El diseño de la interfaz y de la experiencia de usuario de la herramienta ha supuesto un gran reto ya que debía ser funcional a la vez que intuitiva, dado que la gestión de los modelos es un proceso complejo, se llevaron a cabo diferentes propuestas hasta encontrar una forma definitiva. Para lograr una interfaz funcional se diseñaron varias alternativas que contemplaban distintos tipos de navegación, como por ejemplo una navegación mediante pestañas de un mismo formulario, obteniendo al final un mapa con el resultado. Otra de las propuestas buscaba crear un menú de herramientas inspirado en los clásicos softwares SIG de escritorio, que se descartó por añadir complejidad innecesaria a la herramienta. Tras varias propuestas se ha optado por una mezcla de estas, centrando la navegación en el mapa, solicitando al usuario seleccionar un ámbito de estudio concreto (comarca) y tras esto activar un menú lateral que recoge solo aquellas funciones necesarias para implementar el modelo sobre esa zona. Esto permite un uso simplificado de la herramienta, apostando así por un diseño centrado en la funcionalidad.

Se utilizaron tecnologías web como HTML, CSS y JavaScript para implementar la interfaz. El diseño se centró en mostrar de manera clara y organizada los diferentes elementos y funcionalidades disponibles. Además, se tuvo en cuenta la coherencia visual y el uso adecuado de colores y tipografías para asegurar una experiencia visual agradable y cohesiva (Figura 2).



Figura 2. Pantalla principal herramienta

Cada una de las opciones del menú lateral abre un modal que muestra diferentes herramientas para realizar cálculos en base a la estructura del modelo (pero con valores personalizados) y opciones de visualización sobre el mapa.

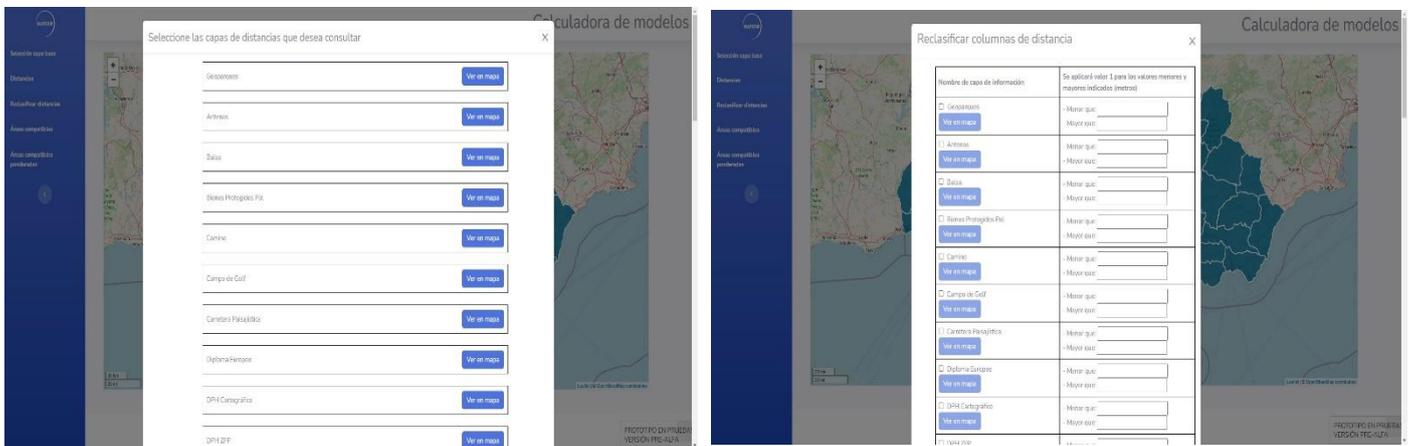


Figura 3. Ejemplos de menús de análisis y visualización

2.3 Fase de desarrollo

Una vez que los requisitos han sido establecidos y la estructura del proyecto ha sido diseñada, el enfoque se centra en la construcción del software a través de la codificación. Durante esta etapa, se combinan los distintos elementos del software y se crean las funcionalidades necesarias para alcanzar los objetivos previamente establecidos en las fases anteriores.

A lo largo de este proceso se afrontaron distintos retos que se abordaron de manera exitosa, encontrando soluciones adecuadas para cada uno de ellos. Algunos de éstos incluyeron:

- Integración entre el *backend* y el *frontend*: Durante el desarrollo de aplicaciones web, el uso de diferentes lenguajes de programación puede generar complejidades adicionales. Para abordar la necesidad de establecer conexiones dinámicas entre *Javascript* y la base de datos, que se realiza a través de *PHP*, se optó por utilizar *AJAX* en conjunto con *JQUERY*.
- Conexión con la base de datos: Durante el desarrollo del software se han tenido muy en cuenta las diferentes consultas CRUD a la base de datos. Estas han de trabajar con una gran cantidad de datos, por lo que se han realizado multitud de pruebas para conseguir las más eficientes. Aun así, todavía es necesario trabajar para conseguir un modelo más rápido, ya que en ciertas circunstancias las consultas se alargan en el tiempo debido precisamente, a la gran cantidad de datos.
- Aplicación de consultas personalizadas: La herramienta debe permitir que los usuarios puedan aplicar cálculos con valores seleccionados por ellos. Por esto, se ha diseñado la aplicación para que una vez reconocidas aquellas variables (capas de información) a tener en cuenta en los diferentes cálculos, los usuarios puedan vincular valores concretos a cada variable. Obteniendo resultados diferentes según sus propias directrices.
- Representación sobre el mapa: Este punto ha supuesto uno de los mayores retos debido a que la gran cantidad de puntos a representar impedían un funcionamiento fluido del mapa. Se han realizado multitud de pruebas para conseguir que el funcionamiento fuese dinámico, desde consultas directas a la base de datos a consultas a la base de datos y la transformación de los resultados en archivos *geojson* (una vez creados solo se volvía a consultar a la base de datos si había habido un cambio en la información). Por otro lado, la indexación temática y espacial en *PostgreSQL/PostGIS*; ayudó a mejorar el rendimiento de las consultas, pero no en la geovisualización de estas. Finalmente se optó por crear un sistema propio, en el que la herramienta, mediante *PHP*, inserta los datos en la base de datos, obtiene la respuesta desde el servidor y mediante la API se conecta a un *Geoserver* (GeoServer Development Team, 2024) y crea una capa y un diseño nuevos. A posteriori si el usuario desea representar los datos se hará la consulta directamente a *Geoserver*, obteniendo un *WMS* y facilitando así la representación (Figura 4).



Figura 4. Procedimiento para la inserción de datos y ejemplo de visualización

3. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El desarrollo del prototipo del software para la zonificación e implantación de proyectos de energía renovable ha puesto de manifiesto varios aspectos técnicos cruciales que son fundamentales para el desarrollo exitoso de herramientas tecnológicas en el ámbito de la transición energética. Las conclusiones técnicas derivadas de este proyecto se pueden resumir de la siguiente manera:

- La elección de *PostgreSQL/PostGIS* y la adopción del patrón de arquitectura software modelo-vista-controlador (MVC) han demostrado poseer una gran potencialidad para gestionar de manera eficaz los complejos datos geoespaciales y asegurar una estructura de software modular y fácil de mantener. Esta elección tecnológica ha permitido una gestión eficiente y precisa de la información geográfica, clave en la evaluación de áreas idóneas para la implantación de energías renovables.
- Uno de los retos más significativos fue la gestión efectiva de grandes cantidades de datos geográficos. El hecho de trabajar en una plataforma online ha complejizado este trabajo, pero a la vez aporta ciertos valores como la compartición de la herramienta y su uso universal. Todo esto ha llevado a un desarrollo personalizado y adaptado a la herramienta que posee su propio valor.
- La combinación efectiva entre el *backend* y el *frontend*, especialmente en lo que respecta al manejo dinámico de consultas SQL complejas y la gestión de datos geoespaciales. La adopción de tecnologías web como HTML, CSS, JavaScript, junto con AJAX y JQUERY, ha facilitado una experiencia de usuario fluida y eficiente, demostrando la importancia de seleccionar adecuadamente las herramientas de desarrollo frente a desafíos específicos de integración.
- El diseño de la interfaz del usuario se centró en la simplicidad y la claridad, subrayando la importancia de la usabilidad en el desarrollo de software, especialmente en aplicaciones destinadas a un público amplio y diverso.
- La capacidad de personalizar parámetros y criterios dentro del software refleja un enfoque flexible e inclusivo hacia la modelización de proyectos de energía renovable. Esta característica asegura que el software pueda adaptarse a diferentes necesidades y condiciones locales, demostrando la importancia de la flexibilidad en el diseño de herramientas de evaluación.

Como prototipo esta herramienta sienta las bases para futuras mejoras y futuros estudios de modelos de implantación. La experiencia adquirida permitirá en un futuro obtener una mejor herramienta y optimizar los procesos, reduciendo los tiempos de desarrollo y mejorando la eficacia de las soluciones propuestas.

AGRADECIMIENTOS

La publicación es parte del Proyecto TED2021-129484A-I00, financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por la Unión Europea “NextGenerationEU”/PRTR

4. BIBLIOGRAFÍA

- Díaz-Cuevas, P. (2013). Energía eólica y territorio. Potencialidades para la Implantación eólica en Andalucía. Tesis doctoral. Inédita. Universidad de Sevilla.
- Díaz Cuevas, P., Pita López, M. F., Fernández Tabales, A., & Limones Rodríguez, N. (2017). Energía eólica y territorio en Andalucía: diseño y aplicación de un modelo de potencialidad para la implantación de parques eólicos. *Investigaciones Geográficas*, (67), 9–29. <https://doi.org/10.14198/INGEO2017.67.01>
- Díaz-Cuevas, P., Camarillo-Naranjo, J.M. & Pérez-Alcántara, J.P. (2018). Relational spatial database and multi-criteria decision methods for selecting optimum locations for photovoltaic power plants in the province of Seville (southern Spain). *Clean Techn Environ Policy* 20, 1889–1902. <https://doi.org/10.1007/s10098-018-1587-2>
- GeoServer Development Team. (2024). REST configuration API reference. En *GeoServer 2.25.x User Manual* (cap. REST API). Open-Source Geospatial Foundation. <https://docs.geoserver.org/stable/en/user/rest/api/index.html>
- Gómez, L. I. (2020). Vector vs Raster: ¿Cuál es la diferencia entre estos tipos o formatos de datos espaciales GIS? *EcoScript*. <https://ecoscript.org/vectorvsraster/>
- Hernández, R. D. (2021). El patrón modelo-vista-controlador: Arquitectura y frameworks explicados. *FreeCodeCamp*. <https://www.freecodecamp.org/news/el-patron-modelo-vista-controlador-arquitectura-y-frameworks-explicados/>
- Junta de Andalucía. (2021): “Ley de Impulso a la Sostenibilidad Energética de Andalucía”. En *Boletín Oficial de la Junta de Andalucía (BOJA)*, número de edición 233, páginas 19403/1-19403/135. Sevilla, Junta de

Andalucía. https://www.juntadeandalucia.es/boja/2021/233/BOJA21-233-00135-19403-01_00251661.pdf

Unión Europea. (2023): “Directiva 2023/2413”. En Diario Oficial de la Unión Europea, número de edición 2413. Bruselas, Unión Europea. <http://data.europa.eu/eli/dir/2023/2413/oj>

SIG en el estudio de riesgo en áreas antropizadas: Barranca de los Coyotes (Guerrero, México)

Ramírez-Romero, R.¹, Ramos-Bernal, R.N.^{2,3}, Romero-Rojas, W.², Vázquez-Jiménez, R.^{2,3}, Casarrubias-Castillo, A.^{1,2}

¹ Maestría para la Innovación y Desarrollo Tecnológico, Universidad Autónoma de Guerrero, 39070 Chilpancingo (Guerrero, México).

² Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Guerrero, 39070 Chilpancingo (Guerrero, México).

³ Research Group on Technologies for Landscape Analysis and Diagnosis (TADAT), Department of Chemical and Environmental Technology, ESCET, Rey Juan Carlos University, 28933 Móstoles, (Madrid, Spain).

11082541@uagro.mx, <https://orcid.org/0009-0002-2443-5474>

rnramos@uagro.mx, <https://orcid.org/0000-0001-6284-3263>

geowromero@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5674-9251>

rvazquez@uagro.mx, <https://orcid.org/0000-0003-1693-8303>

11082541@uagro.mx, <https://orcid.org/0009-0008-1825-4451>

RESUMEN: Los riesgos naturales y geológicos representan una amenaza para la sociedad, especialmente en áreas propensas a deslizamientos de tierra e inundaciones, generando un impacto devastador en las viviendas próximas a escurrimientos y barrancas, poniendo en peligro la seguridad y el bienestar de los residentes. La actividad antrópica desempeña un papel crucial en la modificación del terreno natural, transformando el paisaje original en equilibrio. La zona de estudio es la barranca Los Coyotes, al norponiente de Chilpancingo, capital del estado de Guerrero en México, se encuentra en una zona afectada por un deslizamiento activo. El trabajo se centra en la integración de un SIG utilizando ortofotos y modelos digitales de superficie con resolución espacial de 4 cm adquiridos por drones, para realizar un análisis detallado del terreno, además de la integración de un perfil geológico que permite incorporar datos a profundidad, lo que contribuye a una evaluación más completa, con ello se obtendrá una visión holística de las zonas de escurrimientos modificadas por actividad antrópica. Finalmente se desarrolla un análisis comparativo de las condiciones actuales con las condiciones naturales del territorio de 29 años para comprender cómo la intervención humana (urbanización no planificada, la deforestación y la construcción de infraestructuras) puede alterar significativamente el paisaje y aumentar la vulnerabilidad a fenómenos naturales; información que puede ser fundamental para la toma de decisiones sobre medidas preventivas y estrategias de gestión del riesgo para la construcción de territorios inteligentes y seguros.

Palabras-clave: Riesgo, Actividad antrópica, SIG, estado de Guerrero, México.

1. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, según información de la Base de Datos Internacional de Desastres (EM-DAT), los desastres de origen hidrometeorológico, como las inundaciones o los deslizamientos de tierra, representan el 50% de todos, el 45% de todas las muertes registradas y el 74% de todas las pérdidas económicas, lo que se traduce en 2,06 millones de muertes y 3,6 billones de dólares en el periodo de 1970 a 2019 (OMM, 2021).

México es un país expuesto a una gran cantidad de riesgos, derivados de fenómenos físicos e hidrometeorológicos que son considerados como detonantes para los deslizamientos de tierra. Los deslizamientos generan afectaciones en sistemas naturales y sociales con cuantiosas pérdidas económicas y humanas (Ramos-Bernal, 2018). Entre los años 2000 y 2022, el 2010 fue el más costoso considerando daños materiales; los huracanes Alex, Karl y Matthew golpearon fuertemente al país, generando daños por 92.300 MDP, mientras que 2017 fue de mayor impacto por el número de muertes al registrar 877 (CENAPRED, 2022).

Por su ubicación al sur de México, sobre la costa del Pacífico, el estado de Guerrero se encuentra expuesto a procesos de origen hidrometeorológico y sísmico, considerados como los principales detonantes de deslizamientos de tierra. Chilpancingo es la capital y segunda ciudad más poblada de Guerrero, se encuentra sobre un valle aluvial, con elevaciones que van de los 1.220 a los 1.400 msnm, existen zonas con pendientes abruptas dentro del área urbana, producto de un crecimiento urbano desorganizado y sin planeación, así como escurrimientos o barrancas que han sido embovedadas, rellenadas o reducidas (CONURBA, 2021); al norponiente de la capital se encuentra un grupo de colonias de edificaciones sobre un deslizamiento activo lento, con movimiento imperceptible para quienes ahí habitan, donde una delgada capa del suelo superficial sigue la dirección de la pendiente registrando desplazamientos de hasta 16 cm en dos meses (Azabay-Bravo et al., 2022). De acuerdo con Yao et al. (2018) la urbanización aumenta significativamente el riesgo de inundaciones urbanas, Chilpancingo no se encuentra exenta de afectaciones por la cantidad de lluvia registrada en años extraordinarios, ya que además de provocar inundaciones (La Jornada, 2019) también es el factor desencadenante de deslizamientos de tierra registrados en la capital (Ramos-Bernal, 2018). Bajo los antecedentes descritos, resulta relevante desarrollar estudios bajo un enfoque territorial basados en el uso de Sistemas de Información Geográfica que pueden considerarse como un modelo integrador de conocimiento que conjunta marcos teóricos desde distintas disciplinas (Topografía, Cartografía, Fotogrametría, Percepción Remota, entre otras) que permiten visualizar y analizar datos espaciales. Dentro de los marcos teóricos, la fotointerpretación permite examinar el terreno con el fin de identificar componentes naturales y de origen antrópico del paisaje, así como información de elementos geológicos, uso del suelo, cobertura vegetal y zonas preferenciales para la escorrentía de aguas (Espiro y Papetti, 2006). Al incluir datos de elevación y de la distribución actual de elementos como calles, casas y modificaciones de origen antrópico, es posible detectar cambios en las condiciones naturales de los cauces que, al presentarse lluvias extremas, provocarían emergencias en los suelos urbanos adyacentes (Vera-Rebollo y Treviño-Pérez, 2010). Evidenciando así que, la implantación de nuevas actividades en el territorio condiciona situaciones de peligro para los grupos humanos (Conesa-García et al., 2003).

De acuerdo con lo anterior, el análisis comparativo desarrollado comprende el uso de imágenes monocromáticas, ortofotos, modelos digitales de superficie (MDS) y de elevación (MDE) y un perfil geológico para detectar cambios en la mancha urbana, en los sistemas de escurrimientos y la configuración de las calles que han alterado el paisaje natural, donde los pobladores pueden encontrarse vulnerables ante los desastres provocados por la presencia de fenómenos naturales.

2. METODOLOGÍA

2.1. Zona de Estudio

El área de estudio se localiza al Norponiente de Chilpancingo (Figura 1), comprende la barranca “Los Coyotes” de 1.067 metros de largo, clasificada como riesgo medio (Muñiz-Barrera et al., 2020) es un escurrimiento secundario que atraviesa la zona urbana, la mayor parte de este encuentra en estado alterado y descarga al Río Huacapa.

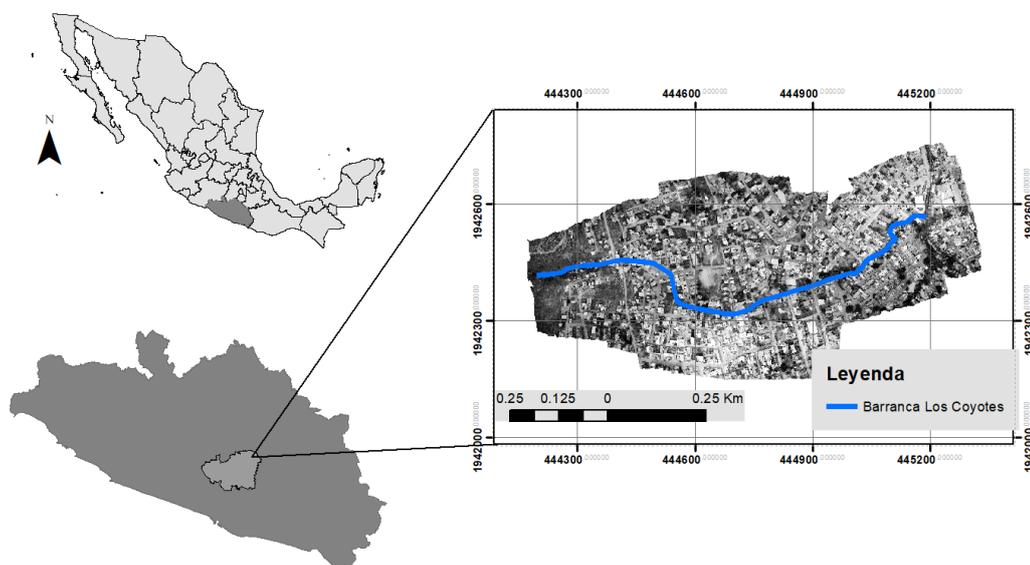


Figura 1. Zona de estudio.

El Área Metropolitana de Chilpancingo, con 333.480 habitantes, posee un crecimiento del 99% en los últimos 30 años (CONURBA, 2021) esto se observa con asentamientos ubicados en zonas no aptas para su construcción (CONURBA, 2021). Dentro del periodo de estudio la precipitación máxima en la zona de estudio fue registrada el 14 de septiembre de 2013, con 185,2 mm (CONAGUA, 2022). Además, la ciudad es susceptible a actividad sísmica por la interacción entre las placas de Norteamérica (continental) y de Cocos (oceánica) y la propia configuración estructural del valle que amplifica de manera considerable las ondas sísmicas (Gomez-Bernal, 1999).

2.2. Insumos

Fueron utilizados los siguientes insumos, como se observa en la Figura 2:

- Ortofoto de la zona a priori. Fue utilizada una ortofoto de Chilpancingo adquirida del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), escala 1:75.000 tomada en febrero de 1995. Se utiliza para observar el proceso de poblamiento de la zona.
- Ortofoto actualizada de la zona. Se obtuvieron 416 imágenes y generaron 135.411 puntos que cubren la zona de estudio, a través del uso de un Vehículo Aéreo no Tripulado (VANT) consistente en un dron Mavik Pro, cuyas características permitieron realizar un solo vuelo. Para realizar la geolocalización se utiliza un equipo Leika GPS-GS 15 y seis marcadores terrestres, pintados previo al vuelo y anclados a la base de la Universidad Autónoma de Guerrero. El vuelo en Dron se programa desde la aplicación DJI, fijando una ruta que cubra al escurrimiento.
- Sección geológica. A través de la aplicación Google Maps se trazó una sección geológica recorriendo el flujo de la barranca definido por Muñiz-Barrera et al. (2020), para analizar la dinámica de la Barranca a lo largo de los 1.067 metros e identificar elementos antropogénicos que modifican la estructura natural del afluente. Dentro de los recorridos programados, con ayuda de expertos en geología, se analizaron cortes y laderas a fin de identificar su composición y el tipo de roca.

2.3. Procesamiento

A partir del levantamiento fotogramétrico, utilizando el software Agisoft Metashape, se obtuvo un MDS que sirvió como insumo para obtener el Modelo Digital de Elevaciones (MDE) el cual contiene valores continuos de altitud espacial a lo largo del recorrido de la barranca. Se utilizó este modelo para crear un modelo de orientación de flujo, el cual a su vez permite crear un modelo de acumulación de flujo, modelando así la dirección preferencial de las pendientes observadas. Al observar el modelo de acumulación de flujo y analizarlo junto con la ortofoto actualizada y las observaciones en campo, es posible validar la dirección del flujo y definir el comportamiento del agua.

A través de la ortofoto actualizada y la ortofoto de 1995 se realizó un análisis cualitativo del paisaje y del entorno, a fin de identificar los procesos de urbanización que cambian la morfología y geometría, tales como calles, casas o muros. A su vez, con la sección geológica definida y el estudio de cortes y laderas se obtuvo un perfil geológico que permite incorporar datos a profundidad en el análisis de las estructuras que modifican el sentido del flujo de agua a fin de orientarlo hacia el río Huacapa.

La Figura 2 explica el proceso metodológico para el desarrollo del presente documento.

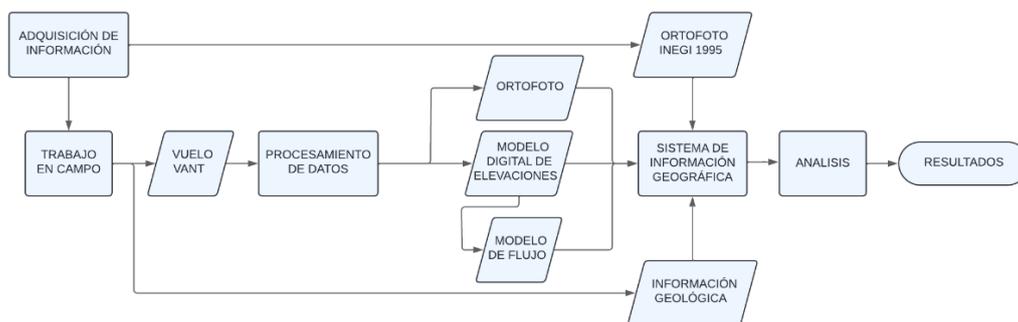


Figura 2. Esquema general de la metodología.

3. RESULTADOS

Siguiendo la metodología del trabajo, se han identificado los elementos que han impactado en las condiciones naturales del afluente de la Barranca “Los Coyotes” (Figura 3).

1. La Figura 3A muestra la ortofoto monocromática de 1995 en la cual se observa al cauce (eje amarillo) claramente definido. En la zona se ve una ocupación principalmente por actividad agrícola, además de mostrar rastros de vegetación con la cubierta de selva baja caducifolia (INEGI, 2001). En ella también se observan caminos de terracería lo cual favorece el proceso de filtración natural de la lluvia y la escorrentía natural.
2. La Figura 3B muestra la ortofoto de 2024 adquirida por VANT, en ella se hace una superposición del cauce natural de 1995 (eje amarillo) y el encausamiento modificado (eje azul) actualmente. La zona presenta una ocupación principal por asentamiento humano y pequeñas zonas agrícolas en la parte central. Al poniente, donde se presenta un relieve más abrupto se observa vegetación correspondiente a la ocupación de selva baja caducifolia. Aunque los dos escurrimientos siguen la misma trayectoria hasta desembocar al Huacapa (al Este), si se aprecian modificaciones principalmente al poniente donde se tienen las elevaciones más altas.
3. Dentro de los elementos espaciales observados esta la pavimentación de las calles (Figura 3C) que disminuye la permeabilidad de la zona, ocasionando que el agua no pueda infiltrarse adecuadamente al subsuelo y aumentando así el caudal de los escurrimientos.
4. Otro elemento importante es el relleno. Existe una zona adyacente a la colonia “El Salado”, donde se observan cambios originados por el relleno con material de desecho o escombros, el cual es susceptible a la remoción (Figura 3D).
5. Se encontraron edificaciones que obstruyen el flujo natural; estas abarcan parte del cauce natural de la barranca, condicionando el ancho del caudal y con ello su velocidad (Figura 3E). En la parte más baja de la Barranca, se tienen identificadas tres edificaciones que se encuentran dentro de la zona federal de 5 metros de acuerdo con la Ley de Aguas Nacionales, tienen acceso mediante puentes provisionales, y sus cimientos se encuentran expuestos dada la remoción del material.
6. La Figura 3F muestra la afectación a una vivienda que actualmente se encuentra habitada, a consecuencia de la creciente escorrentía en temporada de lluvias. Como puede observarse en la imagen parte de la cimentación de la vivienda ha sido removida ocasionando que a su vez presente una inclinación y la haga vulnerable ante los procesos de remoción del suelo.

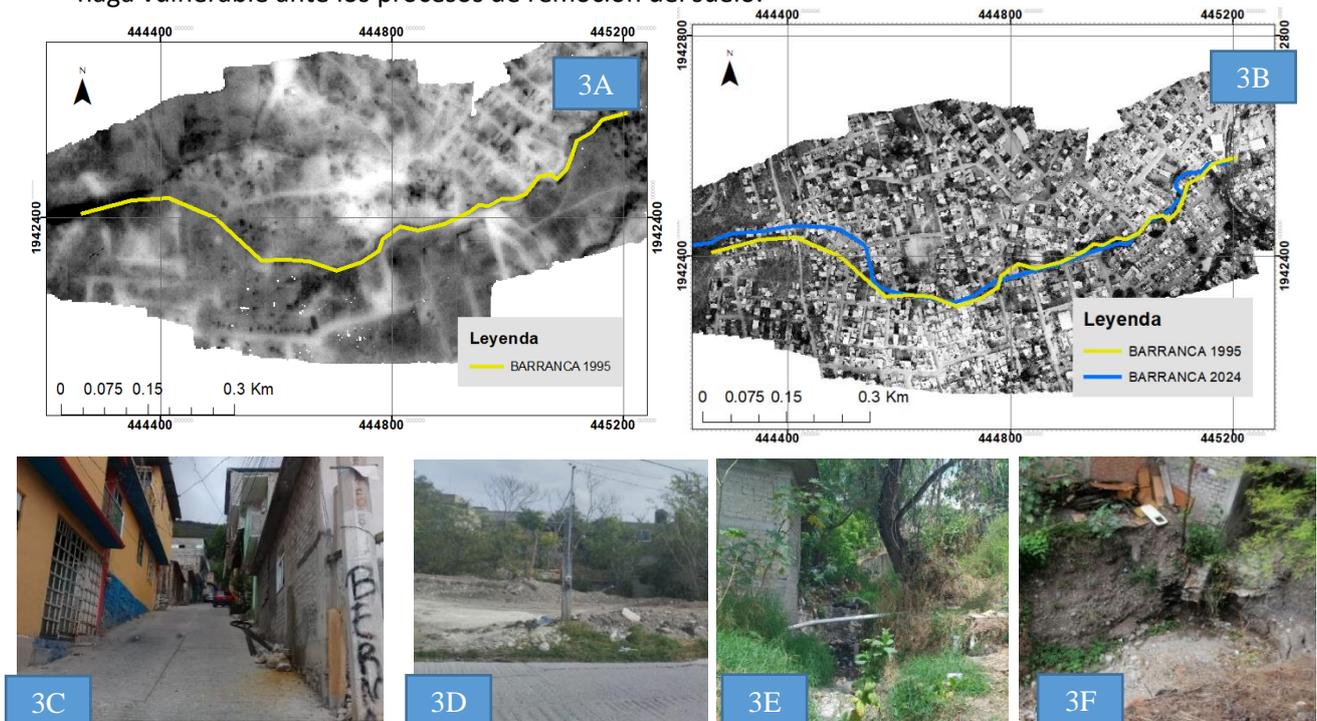


Figura 3. Ortofotos y evidencia fotográfica. A) Cauce original, B) Cauce modificado, C) Calles pavimentadas, D) Relleno de material, E) Obstrucción del flujo natural por edificaciones, F) Vivienda afectada por la escorrentía y remoción de material.

El modelo de acumulación de flujo asigna valores en función del número de celdas que convergen de una pendiente mayor a una menor, a partir de este modelo es posible apreciar las celdas dónde existe mayor acumulación de flujo, las cuales se orientan en dirección al cauce definido en campo.

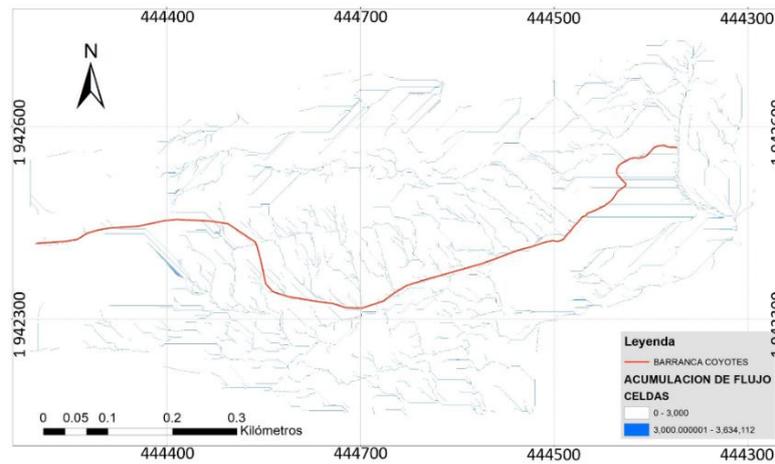


Figura 4. Modelo de Acumulación de Flujo.

Respecto a la geología de la zona (Figura 5) se observa que, en las altitudes mayores, se presentan afloramientos de calizas, posteriormente conglomerados con clastos de origen sedimentario y matriz arcillosa y deleznable. En la parte media y hacia el río Huacapa, se encuentran intercalaciones de arcillas con materiales removidos no consolidados producto de la remoción de materiales. La altitud va de los 1.259 a los 1.393 msnm. Se presentan cambios entre los tipos de roca, que suelen ser progresivos e intercalados

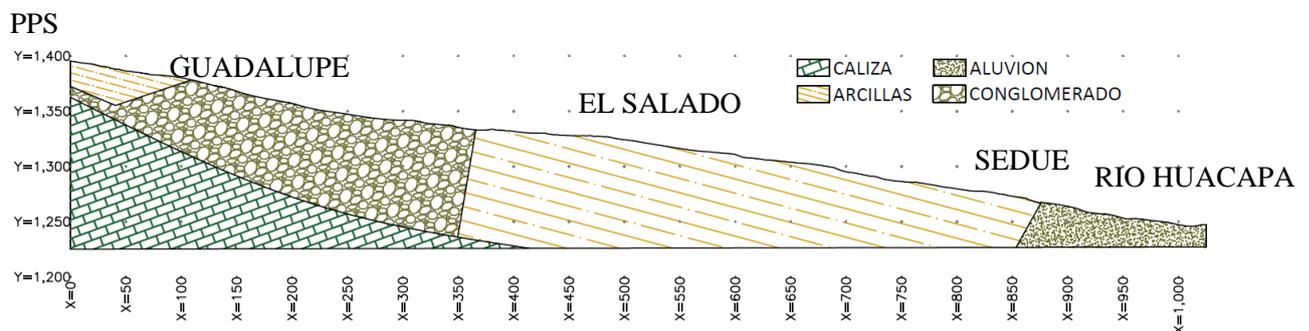


Figura 5. Perfil geológico de la barranca Los Coyotes.

4. CONCLUSIONES

El análisis de las condiciones actuales comparado con las condiciones naturales existentes hace 29 años, permitió comprender cómo la intervención humana ha alterado significativamente el paisaje en la zona de estudio y en combinación con la composición del suelo se ha aumentado la vulnerabilidad ante la presencia de fenómenos naturales; información que puede ser fundamental para la toma de decisiones sobre medidas preventivas y estrategias de gestión del riesgo para la construcción de territorios inteligentes y seguros.

Con los resultados obtenidos se muestra que los Sistemas de Información Geográfica permiten la representación espacial de diferentes tipos de datos para hacer estudios sobre los sistemas de escurrimientos. Los resultados pueden proporcionar más información añadiendo variables que permitan construir inventarios, categorizando las alteraciones a los sistemas de escurrimientos y analizar el riesgo en función del tipo de alteración, así como la evaluación de este; diseñar y generalizar este tipo de estudios permitiría mejorar los planes de gestión de riesgos y de desarrollo urbano, a fin de tener políticas públicas efectivas para mejorar las condiciones de vida en el territorio.

5. BIBLIOGRAFÍA

Azabay-Bravo et al. (2022). Monitoreo GPS-GNSS DE LA ZONA NORPONIENTE EN LA CIUDAD DE CHILPANCINGO, GUERRERO, POR PROCESOS DE REMOCION EN MASA (PRM). Ponencia en Congreso Internacional sobre Tecnología, Innovación, Calidad y Productividad para el Desarrollo Económico de las Naciones.

- CENAPRED (2022). Impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en México. Fuente: <https://www1.cenapred.unam.mx/es/Publicaciones/archivos/494-RESUMENEJECUTIVOIMPACTO2022.PDF>
- Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED). EM-DAT. Fuente: <https://www.emdat.be/>
- CONAGUA (2022). Información Estadística Climatológica. Estación Chilpancingo. Fuente: <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>
- Conesa-García et al. (2003). Los procesos de riesgo con origen natural: Una constante en la relación del hombre y medio. AREAS, Revista de Ciencias Sociales No. 23/2003 (5-15). Fuente: <https://revistas.um.es/areas/article/download/117851/111431>
- CONURBA (2021). Plan Municipal de Desarrollo Urbano de Chilpancingo de los Bravo, Guerrero 2021. Fuente: <https://bitacoraterritorial.guerrero.gob.mx/wp-content/uploads/2023/06/PMDUChilpancingo.pdf>
- Espiro, V.E. et al. (2006). Interpretación de fotografías aéreas y arqueología socialmente útil. Revista de Ciencia y Técnica No. 12. Universidad Nacional de Catamarca. Fuente: <https://editorial.unca.edu.ar/Publicacione%20on%20line/CIENCIA%20Y%20TECNOLOGIA/Rev.%20CyT%20PDF/RevCyT12/cinco.pdf>
- Gomez-Bernal et al. (2012). Estudio de la estructura del subsuelo y los efectos de sitio en Chilpancingo, Guerrero, México. Rev. Int. De Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil. Vol 10(2) 163. Fuente: https://www.researchgate.net/profile/Alonso-Gomez-Bernal/publication/262372990_ESTUDIO_DE_LA_ESTRUCTURA_DEL_SUBSUELO_Y_DE_LOS_EFECTOS_DE_SITIO_EN_CHILPANCINGO_GUERRERO_MEXICO_1_STUDY_OF_THE_SUBSOIL_STRUCTURE_AND_SITE_EFFECTS_IN_CHILPANCINGO_GUERRERO_MEXICO/links/00463537663ba4a8b5000000/ESTUDIO-DE-LA-ESTRUCTURA-DEL-SUBSUELO-Y-DE-LOS-EFECTOS-DE-SITIO-EN-CHILPANCINGO-GUERRERO-MEXICO-1-STUDY-OF-THE-SUBSOIL-STRUCTURE-AND-SITE-EFFECTS-IN-CHILPANCINGO-GUERRERO-MEXICO.pdf
- INEGI (2001). Conjunto de datos vectoriales de la carta de Uso del suelo y vegetación. Escala 1:250 000. Serie II. Continuo Nacional. Fuente: <https://www.inegi.org.mx/temas/usosuelo/> (consultado el 25 de mayo de 2024)
- La Jornada (2019). Reportan inundaciones en Tixtla, Mochitlán y Chilpancingo por 'Lester'. Fuente: <https://www.jornada.com.mx/notas/2022/09/17/estados/reportan-inundaciones-en-tixtla-mochitlan-y-chilpancingo-por-lester2019/> (consultado el 5 de julio de 2024)
- Muñiz-Barrera et al. (2020). Análisis de la Vulnerabilidad de los deslizamientos de laderas en la ciudad de Chilpancingo, Gro. Conference: Academia Journals 2020. Fuente: https://www.researchgate.net/publication/342154335_ANALISIS_DE_VULNERABILIDAD_DE_LOS_DESLIZAMIENTOS_DE_LADERAS_EN_LA_CIUDAD_DE_CHILPANCINGO_GRO
- Organización Meteorológica Mundial (2021). Atlas de la OMM sobre Mortalidad y Pérdidas económicas debidas a fenómenos meteorológicos, climáticos e hidrológicos extremos (1970 – 2019). Fuente: <https://library.wmo.int/viewer/28270/#page=1&viewer=picture&o=bookmarks&n=0&q=>
- Ramos-Bernal, R. (2018). Estudio de la susceptibilidad al deslizamiento de laderas en el Estado de Guerrero, México, aplicando Tecnologías de Información Geográfica. Tesis Doctoral, Universidad Rey Juan Carlos. España.
- Vera Rebollo, F., & Treviño Pérez, A. (2010). Transformaciones antrópicas e inundabilidad en áreas turísticas litorales: estudio de caso de la costa de Orihuela (Alicante). Papeles de Geografía, (51-52), 317–326. Fuente: <https://revistas.um.es/geografia/article/view/114611>
- Yao, L., Wei, W., Yu, Y. et al. (2018). Rainfall-runoff risk characteristics of urban function zones in Beijing using the SCS-CN model. J. Geogr. Sci. 28, 656–668 (2018). <https://doi.org/10.1007/s11442-018-1497-6>

Uso del índice biótico del suelo para la estimación de la vulnerabilidad a desastres por efecto de aguas de escorrentías urbanas

J. Vargas Arguedas¹

¹Escuela de Topografía Catastro y Geodesia, Universidad Nacional de Costa Rica. Av. 1, C. 9, 86-3000 Heredia, Costa Rica.

juan.vargas.arguedas@una.cr

RESUMEN: La presente investigación aplica el Índice Biótico del Suelo (IBS) en el distrito Mercedes del cantón Central de Heredia, Costa Rica. El IBS, desarrollado por la agencia BCN Ecología (2008), evalúa la relación entre superficies funcionales en el ciclo natural del suelo y la superficie total de un área. En Mercedes, los cambios de uso de la tierra son volátiles debido a la alta demanda inmobiliaria en el corredor de inversión entre Heredia y Belén, orientado a usos comerciales e industriales (Masís y Vargas, 2014). Los resultados indican que, aunque el IBS actual supera el objetivo mínimo del 30%, se encuentra por debajo del 35% deseable, alertando sobre la necesidad de preservar áreas permeables. Los hallazgos destacan la falta de cumplimiento normativo en el desarrollo urbanístico y la carencia de control por parte de las autoridades locales y ambientales.

Palabras-clave: Índice Biótico del Suelo, Uso del Suelo, Urbanización, Sostenibilidad, Mercedes, Heredia, Costa Rica.

1. INTRODUCCIÓN

El Índice Biótico del Suelo (IBS) es un valor que mide la proporción de superficies que contribuyen al ciclo natural del suelo en relación con la superficie total estudiada (BCN ECOLOGIA, 2008). Este índice se aplicó en el distrito Mercedes, Heredia, para evaluar el impacto del cambio de uso del suelo en la sostenibilidad urbana. La urbanización descontrolada y el crecimiento inmobiliario han alterado significativamente el equilibrio hombre-naturaleza, aumentando la impermeabilización del suelo y reduciendo las áreas verdes disponibles, lo cual es consistente con los datos del INEC sobre el aumento de la población urbana del 59% al 72.8% entre los años 2000 y 2011 (Segovia-Fuentes, 2019).

2. METODOLOGÍA

La investigación tiene un enfoque mixto, a pesar que inicialmente se percibía como una investigación meramente cuantitativa por la razón principal que el IBS es un valor numérico y su objetividad en los resultados así lo ameritaba, al incorporar otros indicadores territoriales como la densidad poblacional, hace de la investigación una perspectiva más amplia y profunda del fenómeno para determinar que el IBS es un insumo válido para la medición de la vulnerabilidad a desastres por aguas de escorrentías urbanas, que además tiene un potencial uso para orientar la toma de decisiones en el ordenamiento territorial.

El propósito de este estudio fue relacionar el IBS como un estimador de la exposición a desastres por efecto de aguas de escorrentía, debido a la cobertura urbana. Caracterizando el uso del suelo del distrito por medio de la clasificación del tipo de superficie y su factor correspondiente en función de su grado de naturalidad (FAS), según se muestra en la siguiente tabla 1 (Tipo de superficie y su respectivo factor) y de esta manera por medio del IBS recolectar y analizar datos de los indicadores por área y factor de permeabilidad del suelo utilizando el análisis de las ortofotos escala 1:5000 (2014-2017) de la zona de interés.

Una vez asignado el valor a cada tipo de superficie en la zona estudiada, el índice principal de la presente investigación se aplica para el área total del distrito Mercedes de Heredia, que según la cartografía oficial 1:5000 del Instituto Geográfico Nacional (IGN) de Costa Rica es de 4.15 km².

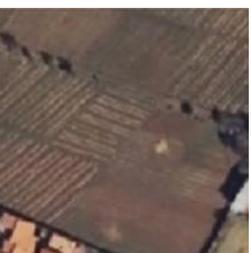
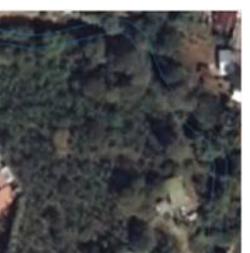
El cálculo del IBS se realizó mediante la siguiente fórmula, obteniendo un resultado general en términos porcentuales:

$$IBS = (\sum(FAS \times \alpha))/At \quad (1)$$

Dónde **FAS** es el factor superficial, **a** es el área de la superficie y **At** es el área total de la zona de estudio.

Se establecieron parámetros de evaluación: un objetivo mínimo de 30% y un valor deseable de 35%.

Tabla 1. Tipo de Superficie y su respectivo factor. Fuente: elaboración propia

Tipo de superficie	Superficies impermeables	Superficies semipermeables	Espacios verdes con conexión con suelo natural	Suelo natural
Factor Superficial (FAS)	0	0.5	0.7	1
Descripción	Pavimentos rígidos (losas de concreto) o flexibles (asfalto), construcciones en general que dejan sin funciones ecológicas, impermeabilizado respecto al aire y agua.	Superficies de ruedo con materiales granulares, permite el traspaso de aire y agua e infiltración. Antejardines con zacate block o adoquines, patios posteriores.	Pastos, jardines, cementerios, áreas de cultivo que se vieron intervenidas, pero aún permiten el traspaso de aire y agua e infiltración.	Vegetación u ofrecen condiciones para desarrollar, estado natural sin compactar, mantienen todas sus funciones naturales.
Capas SNIT	+Edificaciones +Vías	+Vías	+Cultivos +Pasto	+Forestal +Hidrografía
Fotointerpretación	+Edificaciones	+Antejardines y patios	+Cementerios	+Forestal
Croquis				

Es importante señalar que se utilizan datos espaciales oficiales tomados de la Infraestructura de Datos Espaciales de Costa Rica (IDECORI) que corresponden a entidades públicas o privadas que proveen uno o varios servicios de información georreferenciada interoperables de cobertura nacional, regional o local, que son accesibles a través de Internet con un mínimo de protocolos y especificaciones normalizadas.

Además, los servicios de mapas estándar de OGC (Open Geospatial Consortium) los cuales promueven el desarrollo y uso de técnicas y estándares de sistemas abiertos en el campo de la información geográfica que se publican desde el Instituto Geográfico Nacional, así como por otras entidades. La información está disponible en el visor y los geoservicios, tanto en la proyección CRTM05 (EPSG:5367) como en la proyección WGS84 (EPSG:4326).

Para determinar la densidad poblacional se utiliza la información oficial del Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC) respecto a la población según el censo del año 2011, a nivel de las Unidades Geoestadísticas Mínimas (UGM). En nuestro país, el INEC asigna esta clasificación a las UGM, que son áreas geográficas menores al distrito y se delimitan con fines operativos. Al ser áreas geográficas de menor tamaño son más homogéneas que los distritos y, por consiguiente, es más exacta la clasificación por zona urbana y rural.

La Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias (CNE) es la institución pública rectora en lo referente a la coordinación de las labores preventivas de situaciones de riesgo inminente, de mitigación y de respuesta a situaciones de emergencia. La información sobre pérdidas por eventos declarados emergencias la suministra específicamente la Unidad de desarrollo estratégico de la CNE.

Heredia es el cantón número 1 de la provincia de Heredia, está formado por 5 distritos administrativos: Heredia, Mercedes, San Francisco, Ulloa y Varablanca. Topográficamente, se ubica en una ladera, entre las cuencas del Río Burío al norte, Quebrada Seca al oeste, el Río Pirro al este y el Río Virilla al sur. Dentro de su estructura organizacional del gobierno local se cuenta con el Departamento de Desarrollo Territorial que facilita, para los efectos de la presente investigación, la información pertinente al uso de la tierra.

3. RESULTADOS

Los resultados muestran un IBS por encima del 30%, pero inferior al 35%, sugiriendo un riesgo de disminución futura si no se gestionan adecuadamente los usos del suelo (ver Figura 1), especialmente en los 1.05 km² de cultivos y pastos que contribuyen con el 25% del peso total del área (ver Figura 2). Los suelos permeables deben ser protegidos para evitar que el índice caiga por debajo del umbral mínimo, lo cual tendría implicaciones negativas para la sostenibilidad del distrito.

El desequilibrio hombre-naturaleza, a escala global y local, exige fortalecer el papel y la capacidad de las localidades en la implantación de programas que permitan aproximarnos a territorios más sostenibles (Morales Pérez, 2006), siendo el gobierno local y las fuerzas vivas de la comunidad los que deban impulsar estas medidas.

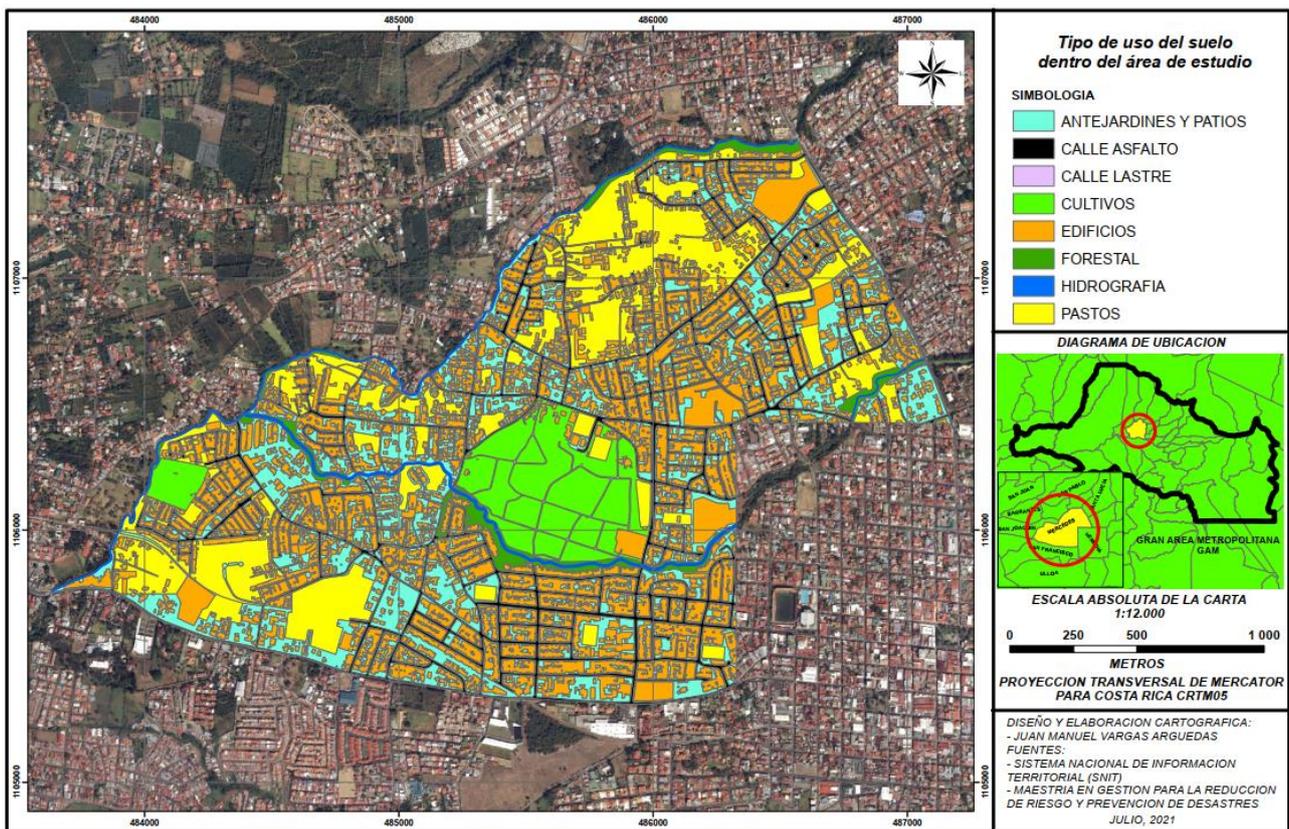


Figura 46. Tipo de uso del suelo dentro del área de estudio. Fuente: elaboración propia

La correlación del IBS con la densidad poblacional, evaluada mediante datos del Censo 2011 y proyecciones al 2019, muestra que Mercedes tiene una densidad en aumento, alcanzando 7080 habitantes por km² en 2019, lo cual supera lo recomendado para un desarrollo urbano sostenible (ver Tabla 2). Esto refleja una tendencia hacia la ocupación de áreas no aptas para residencia, como zonas de protección cercanas a cuerpos de agua.

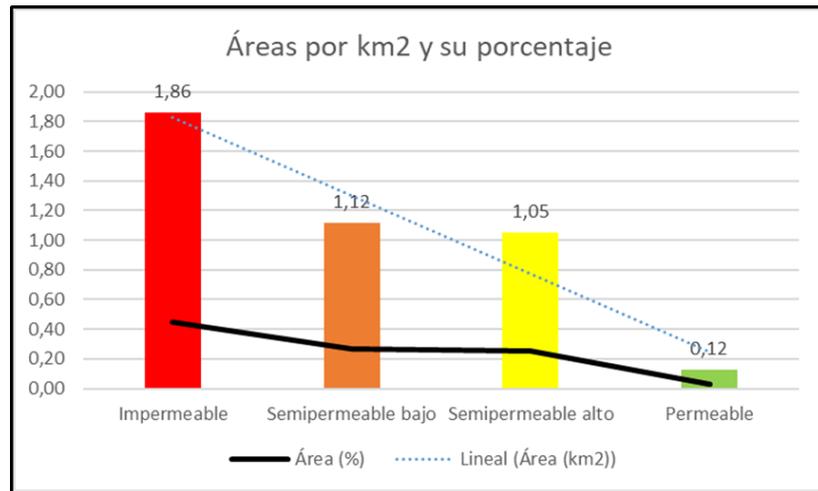


Figura 2. Área por km². Fuente: elaboración propia.

En la figura anterior se materializa la línea de tendencia en el cambio del uso del suelo, cruzando de los suelos permeables en su condición natural, hasta llegar a los suelos impermeables con FAS de 0, pasando en ocasiones de manera temporal en otros usos como lo son los cultivos o pastos, que a la postre en un escenario negativo para el equilibrio, terminan siendo construidos o en su defecto impermeabilizados, o bien las calles granulares que permiten el paso del aire y agua, pero que en algún momento pueden llegar a estar pavimentadas, dejando nula permeabilidad.

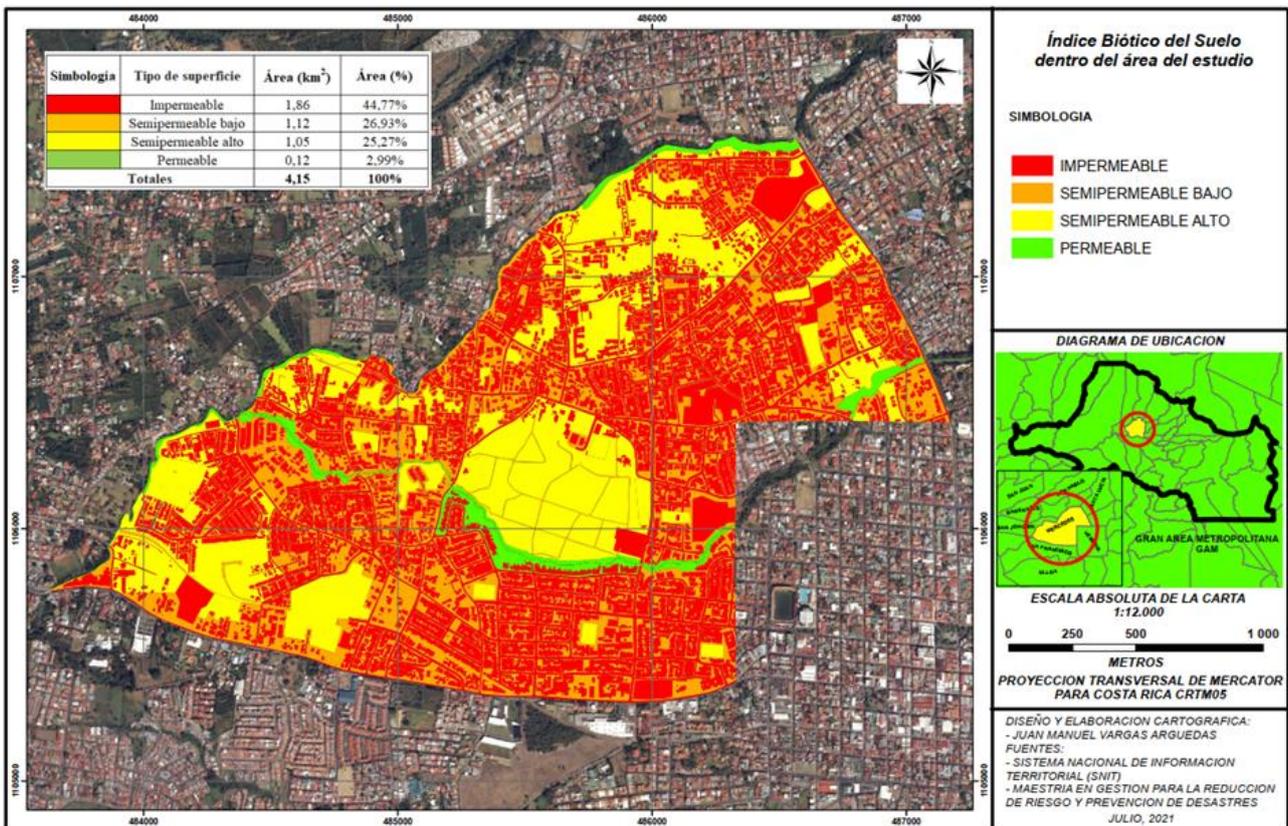


Figura 3. Índice Biótico del suelo dentro del área de estudio. Fuente: elaboración propia.

El código de colores propuesto para el IBS (ver Figura 3), se basa en la tradicional manera de ilustrar con colores fuertes el peligro, en este caso el rojo representa las zonas del distrito Mercedes que tienen 0 permeabilidad en sus superficies, los transitorios en naranja y amarillo considerados semipermeable bajo y alto respectivamente y el extremo positivo de color verde (suelos naturales).

Tabla 2. Densidad poblacional por distritos del Cantón Central de Heredia. Fuente: elaboración propia

DENSIDAD POBLACIONAL POR DISTRITOS DEL CANTON CENTRAL				2011 al 2019	
Distrito	Habitantes 2011	Habitantes proyectados 2019	Área (km ²)	Densidad 2011	Densidad 2019
San Francisco	51 307	57 879	6,56	7821	8823
Mercedes	26 611	29 383	4,15	6412	7080
Heredia	19 180	19 143	2,86	6706	6693
Ulloa	30 640	34 344	11,38	2692	3018

4. DISCUSIÓN

La urbanización rápida y la falta de regulación eficaz han llevado a un incremento en áreas impermeables, reduciendo la capacidad del suelo para absorber agua y contribuyendo a problemas como inundaciones e islas de calor. La preservación de áreas permeables, especialmente los suelos naturales y seminaturales, es esencial para mantener un IBS en niveles aceptables y apoyar la resiliencia ambiental del distrito Mercedes.

La situación del distrito en estudio es un reflejo de lo que sucede en general en la mayoría de los distritos del Gran Área Metropolitana (GAM), donde en pocos km² habitan más personas de lo recomendable, en algunos casos utilizando espacios que no son aptos para la residencia, ejemplo de ello la zona de protección de 10 metros en ambos lados de los cuerpos de agua (ver Figura 4).

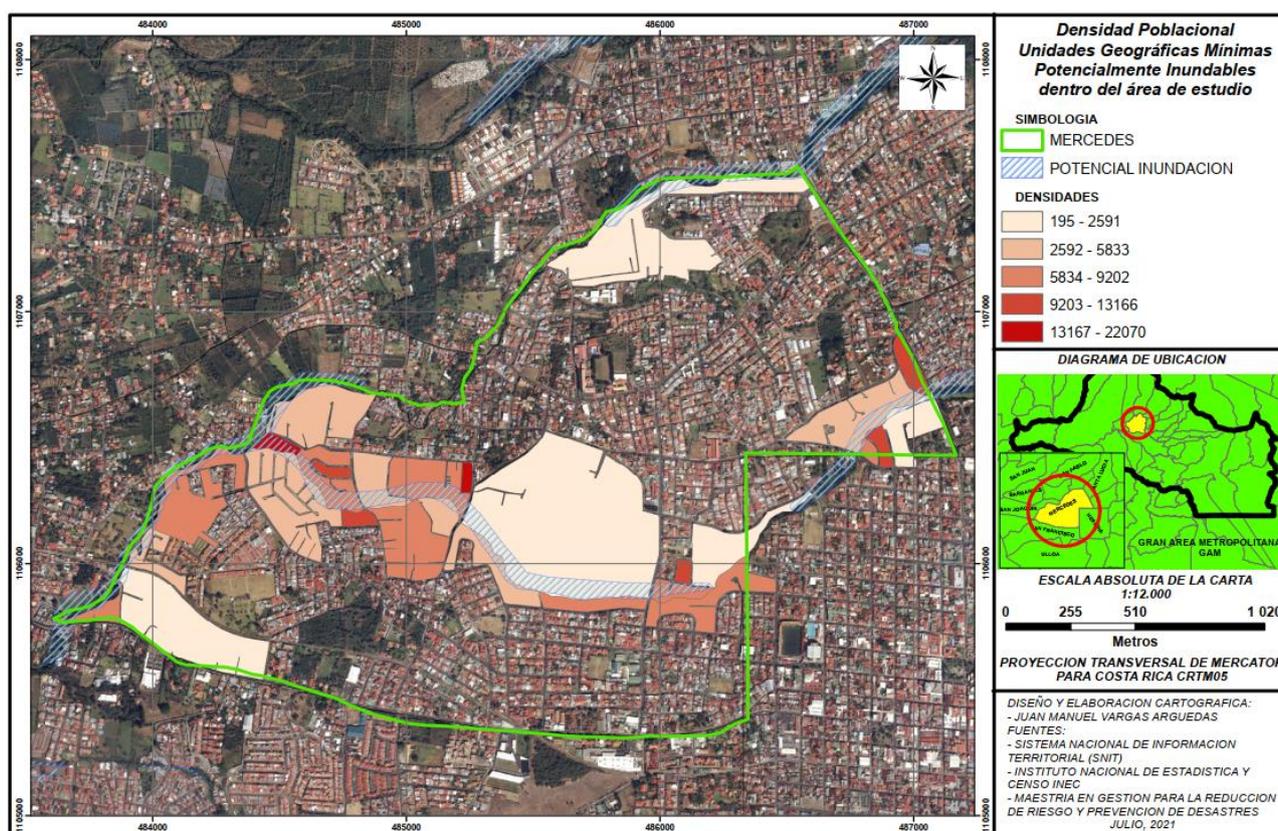


Figura 4. Densidad poblacional por UGM potencialmente inundables en el área estudio. Fuente: elaboración propia.

5. CONCLUSIONES

El estudio de este fenómeno demográfico es de suma importancia, ya que la presión urbanística sobre el territorio se hace cada vez mayor, trayendo con ello consecuencias negativas al entorno, se pueden mencionar y profundizar varias situaciones, entre las más relevantes la destrucción del medio ambiente, disminución de la calidad de vida por falta de áreas verdes, islas de calor, entre otros, donde el área en estudio no

se escapa lamentablemente de esta realidad mundial.

Respecto a la toma de decisiones, se demuestra contundentemente por medio de las altas densidades poblacionales que hay zonas según este indicador territorial que no soportan una mayor presión de habitantes, aunado a ello que algunas de estas densidades altas se ubican en áreas con potencial a inundaciones, refiriéndose a las construcciones existentes, pero a su vez se presta para ubicar los terrenos que a pesar que no son una mayoría están por el momento sin construir, no con ello se pretende impedir los proyectos que en derecho sus propietarios pretendan desarrollar, pero sí se puede tomar una serie de medidas preventivas que beneficien la gestión del riesgo.

En ausencia del Plan Regulador para cantón de Heredia la incorporación de los productos derivados de la aplicación del IBS sería de suma importancia dentro de los programas de ordenamiento territorial, para determinar la relación del área de estudio con sus categorías de permeabilidad. El hecho de que la infiltración prácticamente es nula, pues la cobertura vegetal, ya no existe, dado que fue sustituida por pavimento, metal entre otros materiales que no permiten el paso del aire o agua. Esto provoca que el 90% del agua discurra a velocidades altas, disminuyendo su tiempo de recorrido (Madrigal, 2005).

En fin, la diversidad de nuestros servicios en topografía con el uso de tecnologías y plataformas que se encuentran al alcance del gremio, permiten tener un trascendencia multidisciplinaria para el beneficio de la comunidad nacional y porque no más allá de nuestras fronteras, en este proyecto en específico se utilizó los insumos fotogramétricos del SNIT, pero bien se puede trabajar zonas más específicas con vehículos aéreos no tripulados o bien cubrir mayor proporción de terrenos con uso de imágenes satélites.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional de Costa Rica, especialmente a la Escuela de Topografía, Catastro y Geodesia, que nos permiten compartir y aprender en este evento. Se agradece a la agencia BCN Ecología por la metodología del IBS y al Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC) por los datos demográficos utilizados en este estudio.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Madrigal Mora, J. (2005). Los efectos de las amenazas naturales y antropogénicas en las cuencas hidrográficas de Costa Rica. Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias. /CEDO-CRID/CEDO-CRID V4/pdf/spa/doc2983/doc2983.htm
- Masís Campos, Ramón, & Vargas Picado, Hubert. (2014). Incremento de Áreas Impermeables por Cambios de Usos de la Tierra en la Microcuenca del Río Burío. *Revista Reflexiones*, 93(1), 33-46. [Http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S165928592014000100003&lng=en&tlng=e](http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S165928592014000100003&lng=en&tlng=e).
- Morales Pérez, M., (2006). El desarrollo local sostenible. *Economía y Desarrollo*, 140(2), 60-71.
- Segovia-Fuentes M. (2019). Crecimiento urbano: enfoque territorial fuera de la Gran Área Metropolitana y la provincia de Limón. *Acta Académica*, 63 (noviembre), 43-64. [Http://revista.uaca.ac.cr/index.php/actas/article/view/32](http://revista.uaca.ac.cr/index.php/actas/article/view/32).

Vessants inestables a Alcoi. El cas dels polígons industrials de Santiago Payá, El Clergue i Sant Benet

A. Pastor Valor¹

¹ *Departament d'Anàlisi Regional i Geografia Física, Universitat d'Alacant, Carr. San Vicente del Raspeig, s/n, 03690 Sant Vicent del Raspeig, Alicante, España*

a.pastorvalor@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-2435-7731>

RESUMEN: Els polígons industrials de Santiago Payá, El Clergue i Sant Benet es situen sobre antics meandres del riu Riquer i en un emplaçament que estava abanclat, que front la falta de sòl industrial a Alcoi (Alacant), entre 1960 i el 2000 es va transformar en polígons industrials.

Durant les precipitacions esdevingudes en la borrasca Cèlia, en la primavera de 2022, desencadenaren en la producció d'esllavissades a Alcoi, afectant greument als polígons industrials que s'esmenten. Amb aquest treball es posen en relació els factors físics i antròpics que condicionen i desencadenen aquests fenòmens gravitacionals. Per a poder dur a terme l'anàlisi s'ha fet ús de ferramentes de SIG, que, amb l'ús del dron, han permés la generació d'un Model Digital del Terreny i una ortofoto. El material resultant ha permés realitzar una evolució del lliscament, amb el seguiment dels clavills de tracció que afecten una nau industrial.

Palabras-clave: Alcoi, Borrasca Cèlia, fotogrametria, moviment rotacional, sòl industrial, UAV, usos del sòl.

1. INTRODUCCIÓ

La borrasca Cèlia va donar lloc a la producció de diverses solses a Alcoi i a la reactivació d'un lliscament rotacional en els polígons industrials de Santiago Payá i Sant Benet, al sud de la ciutat. Les causes espaciotemporals d'aquests processos erosius s'interrelacionen amb la litologia i l'estructura dels materials mobilitzats, el pendent, les precipitacions, l'acció antròpica (Ayala-Carcedo, 2002) i els canvis en els usos del sòl.

Al contrari de les precipitacions habituals, les quals poden experimentar elevades intensitats i produir solses o moviments superficials (Gariano i Guzzetti, 2016 i Gariano *et al*, 2022), les precipitacions prolongades amb una baixa intensitat, poden donar lloc a lliscaments de major grandària i a reactivacions. En el transcurs d'aquest episodi, el material margós es va saturar i la seua plasticitat va incrementar (van Beek, 2002), per tant, les aigües subterrànies no pogueren drenar i es produïren nombrosos lliscaments de vessant.

En referència als usos del sòl, els polígons es localitzen sobre un espai abanclat en el qual es desenvolupaven les activitats agràries, què, amb la falta de sòl industrial a la ciutat, s'exerciren unes pressions sobre el territori i donaren lloc a l'increment en la inestabilitat dels vessants. A pesar que hi havia estudis previs que alertaren de possibles esllavissades històriques (Ayala-Carcedo, 1990), el desenvolupament del polígon continuà endavant, a fi d'allotjar el trasllat de les indústries situades dins la ciutat i unes naus amb majors dimensions. A conseqüència de les obres de rebliment, arrasament i remocions en els barrancs i els talussos, l'asfaltatge en els vials, la desorganització de la xarxa hidrogràfica i la sobrecàrrega en els talussos, s'ha produït un increment en l'acumulació de l'escorrentia, en la inestabilitat dels vessants, i en la impermeabilització del sòl.

El tractament cartogràfic ha estat essencial per a treballar a petita escala. Ha permés realitzar una cronologia del retrocés dels clavills de tracció situats a la corona del moviment rotacional mitjançant la fotointerpretació dels vols aeris procedents de l'Institut Cartogràfic Valencià entre el 2009 i el 2022, i el tractament fotogramètric dut a terme amb els vols realitzats amb dron entre juny de 2022 i agost de 2024.

2. ESTAT DE LA QÜESTIÓ

L'àmbit d'estudi es situa en l'encreuament dels polígons industrials de Santiago Payá, Sant Benet, El Clergue i La Beniata, situats al sud d'Alcoi, amb una disposició SW-NE i una forma allargada, ocupant les terrasses fluvials del tram baix del riu Riquer.

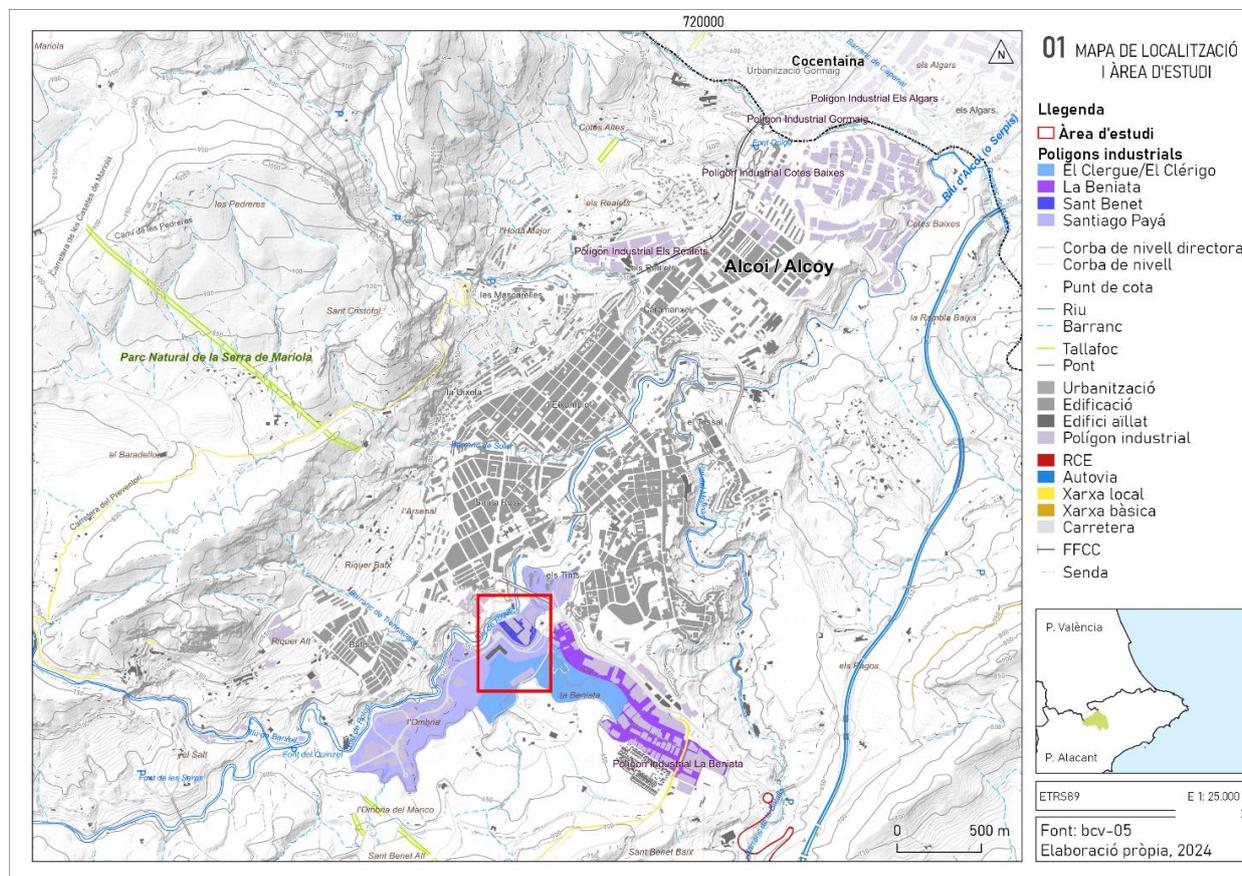


Figura 1. Àrea d'estudi. Elaboració pròpia

El polígon industrial de Sant Benet neix en 1968, fruit d'una agrupació espontània de naus industrials que s'assentaren a principis del segle XX. A causa de la seua configuració orogràfica –es situa sobre un antic meandre del riu Riquer– s'exigiren excavacions per a allotjar la nova indústria planificada i propera als talussos, idè la que ja estava assentada es localitzava prop del riu. Quant al polígon industrial de Santiago Payá, es construí en 1999 per satisfer la falta de sòl industrial que Alcoi patia a finals de segle. Es situa sobre un terreny amb uns pendents laxos i uns talussos d'elevat pendent, constituït per margues tipus tap miocenes i material detrític/al·luvial quaternari, que, per a assentar les naus industrials, degueren executar obres de rebliment, remoció i excavació, eludint l'informe de riscos que elaborà l'IGME en 1990, ja que classifica la zona amb un risc extrem i amb moviments de vessant naturals. El moviment de vessant que es presenta en aquesta comunicació experimentà processos d'acceleració quan es va construir el vial d'accés als dos polígons i els desmunts que es realitzaren als talussos, que foren d'entre 35º i 40º, i en casos puntuals d'entre 60º i 87º, sent l'angle de repòs intern de les margues de 30º. Tot i això, la presència d'aigua en superfície com la possible subterrània produeixen inestabilitats en el terreny generant lliscaments superficials i profunds. I en 2001, els problemes estructurals comencen a ser visibles i obliguen a tallar el trànsit arran l'episodi de precipitacions gener de 2002. Posteriorment, en 2005 es proposa la realització de murs de contenció i la realització d'obres de consolidació de vessants, a fi d'evitar un major moviment en massa. Malgrat tot, no s'aplega a fer pels elevats costos econòmics.

La borrasca Cèlia va ser un episodi excepcional que va començar el 14 de març amb unes incursions de calima que presentaven unes concentracions de pols en suspensió elevades. La situació sinòptica dels dies posteriors, en les capes altes de l'atmosfera, es va produir una vaguada d'aire fred i inestable, que dies després donaria lloc a un embossament d'aire fred. Aquesta situació es va desenvolupar fins al 6 d'abril, descarregant en total 565 l/m², i en el total anual 846 l/m² a la ciutat (Círculo Industrial d'Alcoi i AVAMET, 2024), i nevant als cims de les serres. Aquest episodi va donar lloc, entre altres, a la reactivació d'un lliscament rotacional en els polígons industrials de Santiago Payá i Sant Benet, on els efectes s'observen tant en la figura 1,

2 i 3, i en l'actualitat continuen actius.



Figura 2. Interior de la nau industrial el 13-04-2022 afectada pel lliscament. Font: El Nostre Ciutat.

Figura 3. Imatge del vol realitzat amb dron on es veu el lliscament que va afectar la nau. Autora: Aitana Pastor. 29-06-2022.

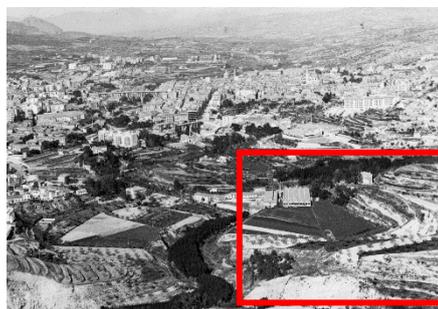


Figura 4. Vial d'accés afectat pel moviment de vessant (clausurat des de 2012 pel mateix motiu).

Autora: Aitana Pastor. 14-04-2022.

Figura 5. Imatge d'Alcoi en 1959 en la que es veu en la marge dret el meandre del riu Riquer i l'actual emplaçament del polígon industrial de Sant Benet. Autor: Mario Domínguez, en Paisajes Españoles

L'esquema que estableixen Crudens i Varnes (1996) per a la definició d'un lliscament rotacional, el defineixen com un moviment que es produeix al voltant d'un eix horitzontal paral·lel a la superfície del vessant o superfície de trencament, que s'esvara en una superfície de lliscament còncava. Perquè es produïska un moviment com aquests, al principi mostra uns indicis -visibles en l'actualitat- que estan mostrant una dinàmica. A la corona o zona superior es mostren uns clavills de tracció transversals amb un retrocés progressiu de la corona; i al peu de l'esllavissada s'observen moviments de flux, fruit de la liqüefacció del material lliscat durant les precipitacions prolongades de 2022. Tanmateix, també s'observaren unes surgències d'aigua procedents dels nous talussos, que són escorrims o fuites, com expressen Giménez Font i Marco Molina (2011).

Aquests lliscaments rotacionals i complexos presenten un major volum de material mobilitzat, on predominen en aquells sectors on es genera un contacte discordant entre les margues i el material col·luvial. Es donen en els vessants baix el glaci, on els peus d'aquests talussos es veuen desestabilitzats per les pressions intersticials, que incrementen quan la pluja s'acumula en aquests dipòsits (van Beek, 2002).

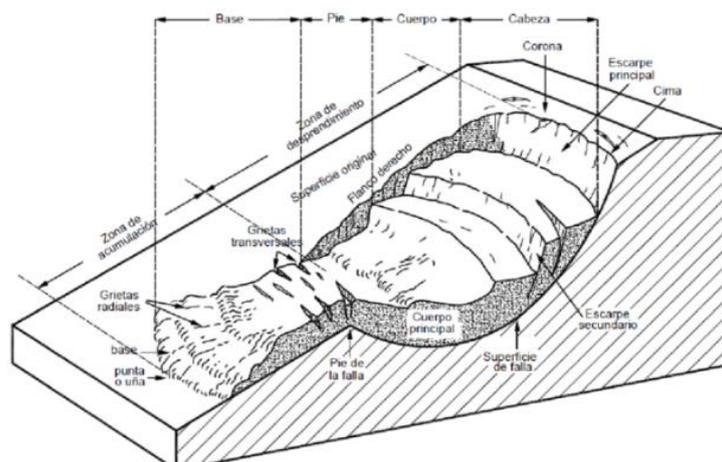


Figura 6. Esquema d'esllavissada rotacional de Crudens i Varnes (1996)

3. METODOLOGIA

El treball de camp ha consistit en la prospecció, delimitació, identificació i seguiment del moviment de vessant mitjançant la presa d'imatges, a fi de controlar els sectors que es menegen.

A banda, s'han dut a terme 6 campanyes de vol amb dron entre maig de 2022 i setembre de 2024 sobre l'àmbit d'estudi, ja que cal dur a terme un seguiment i control efectiu. En aquest cas, el dron, és una ferramenta versàtil que en àrees petites permet prendre imatges abans, durant i després d'un esdeveniment relacionat amb els desastres naturals. També facilita la presa d'imatges d'alta resolució en espais de difícil accés, que posteriorment són processades en ortomosaics i en Models Digitals del Terreny (MDT), el que permet comparar els diferents resultats en distintes dates i analitzar el comportament del vessant. El dron emprat en les campanyes és un DJI mini 4 pro, un multirrotor (quatre rotors) amb sensors omnidireccionals que disposa de posicionament satel·lital (GNSS) GPS-Galileo i es controla remotament des d'un comandament. Té un pes de 249 g (incloses la bateria, les hèlixs) i una durada de vol de 34 min.

El total de les imatges processades foren de 300 i a una altura fixa de 118 m sobre el terreny, amb un angle d'incidència zenital (90°), amb un percentatge de superposició longitudinal i transversal del 80% per cada fotograma i realitzats a la vesprada, a fi de que la incidència solar fora mínima i no provocara ombres ni posteriors errors en el processament fotogramètric. Aquests paràmetres han permès l'obtenció de núvols de punts, amb 50.000 punts per campanya i la consegüent classificació en sòl, punts baixos, edificacions i vegetació alta i baixa; i una vegada obtinguts, s'han reclassificat i depurat. Amb açò, s'ha obtingut una resolució espacial de 3 cm/px en les imatges RGB i de 5 cm/px en els models digitals del terreny.

Les dades adquirides foren processades amb el programa *Agisoft Metashape* v.2.0.1., en el que les coordenades de les imatges de l'UAV foren georeferenciades en el sistema de referència ETRS89 UTM 30N i amb el registre de coordenades X i Y i altura Z en diferents punts de control en cada vol aeri. Posteriorment, mitjançant el *software* CloudCompare v2.13, s'han corregit les diferències ortomètriques amb el sistema Rednap egm 08, de l'IGN. El núvol de punts dispers resultant ha permès extraure sis MDT i sis ortomosaic i realitzar diferències amb els MDT procedents de les dades LiDAR del *Plan Nacional de Ortofotografía Aérea* (PNOA) del *Instituto Geográfico Nacional*. I per a la realització de les diferències entre el vol LiDAR de 2009 amb el de 2016 i de 2016 amb el vol amb dron de 2024, en els que s'han comprovat les zones que han experimentat alteracions, s'ha emprat el programa QGIS 22.6.

4. RESULTATS

Les tècniques de visió computacional aplicades a la fotogrametria, junt a programes SfM aplicats a l'estudi i seguiment de moviments de vessant, han donat lloc a resultats de gran qualitat i precisió. Les ortomosaic i MDT resultants han permès realitzar comparatives en distintes dates, possibilitant obtenir les diferències en el terreny. Com mostren els resultats en les figures 7 i 8, es tracta d'un lliscament rotacional actiu en el que dins d'ells es produeixen esllavissades de menor dimensió i que cabussen en la direcció del riu Riquer.

Les anàlisis de les ortofotografies (Figura 7), junt a les dels vols aeris de l'Institut Cartogràfic Valencià entre el 1999 i el 2022, permeten detectar els desplaçaments en el pla horitzontal en un ordre centimètric i

seguint la inclinació del vessant. La corona del talús té una forma semicircular i experimenta processos de retrocés, de creixement remuntant. En ella, els clavills de tracció que es veuen corresponen a petits descensos de la massa. Tanmateix, en el cos del moviment, travessat pel vial alternatiu d'accés al polígon industrial, també es produeixen moviments, motivats pel mateix lliscament, per la sobrecàrrega dels murs de contenció i per la sobrecàrrega dels vehicles que el travessen. També s'observa un increment en la concentració de l'escorrentia superficial.

La comparació entre els MDT del 2009 i 2016 (Figura 8), procedents del LiDAR, i els realitzats amb dron en les diferents campanyes, mostren una evolució amb la distinció de les zones de depressió en la capçalera i acumulació en el flanc inferior. Els ascensos, que es localitzen al peu, en les naus industrials, s'acumula el material junt a les aigües subterrànies i l'aigua que descendeix procedent de cotes superiors. Sota l'antic vial d'accés, clausurat en 2012 pel moviment de vessant, s'observa el moviment càotic de la massa, amb acumulacions i descensos del material reblit, que experimenten una major erosió en els episodis de precipitacions posteriors als de la borrasca Cèlia en 2022, és a dir, en l'actualitat.

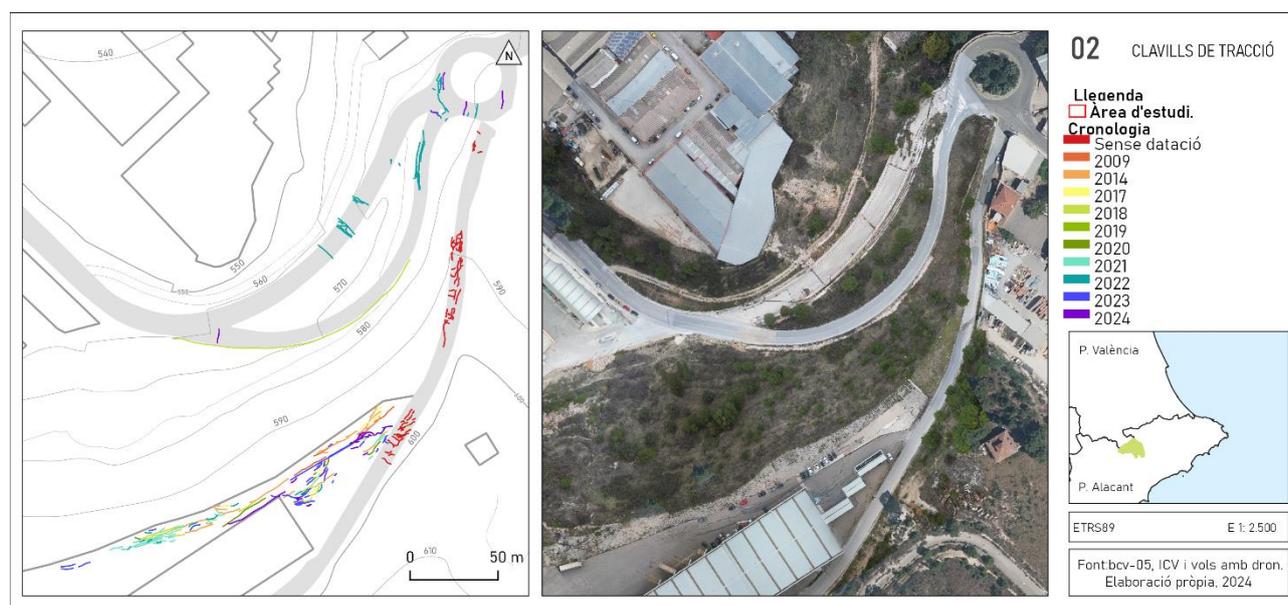


Figura 7. Seguiment dels clavills de tracció que mostren el retrocés de la corona, sent visible també en la redona d'accés al polígon. Elaboració pròpia

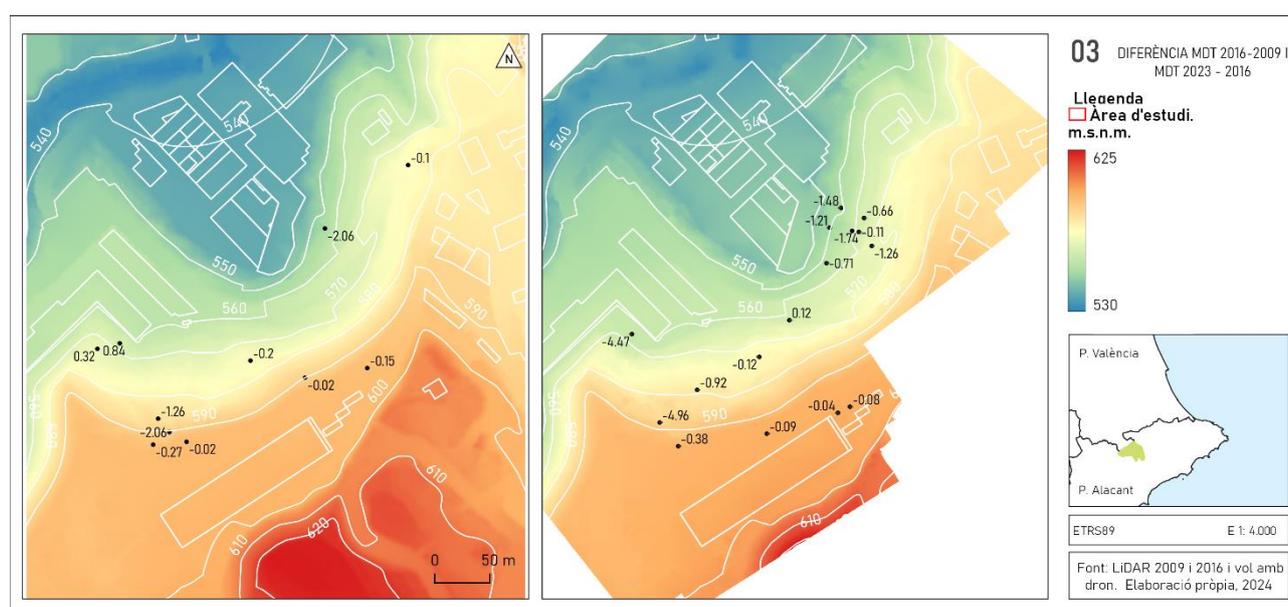


Figura 8. Amb la diferència dels MDT s'han indicat els punts on s'han produït acumulacions i enfonsaments del material, com a mostra d'un lliscament actiu. Elaboració pròpia

- S'observa que és un moviment desenvolupat en el qual es distingeixen diferents zones inestables, que, en el context geològic que es troba, amb materials margosos i al·luvio-col·luvials, es generen bosses d'aigua, experimentant-se increments en les èpoques de pluges.
- El vessant presenta inestabilitats visibles des del començament de les obres en la realització del polígon, i experimenta processos d'acceleració en 2012 i 2022.

5. CONCLUSIONS

Els objectius plantejats al treball s'han desenvolupat de manera grata. S'han obtingut una ortofoto i un MDT que han permès dur un seguiment del moviment de vessant amb la màxima actualitat i la major resolució espacial, que en aquests casos, resulta essencial per al monitoratge de la superfície. La realització de la cartografia i els resultats obtinguts amb els diferents vols aeris han permès comprovar que el vessant s'està lliscant i que pel patró que segueix és el d'un lliscament rotacional que està generant danys en les quatre naus industrials, en la passarel·la que donava accés al polígon i a l'actual vial alternatiu construït en 2012. A banda dels danys observats, els murs de contenció que sostenen les fàcies margoses acceleren el procés del lliscament, reflectint-se en les esquerdes de l'asfalt en el vial alternatiu per la sobrecàrrega generada.

Les característiques de l'episodi que esdevingueren en la reactivació del lliscament són diferents dels altres episodis en els quals les intensitats desencadenaven en sòsides i aquest ha reactivat lliscaments de major grandària i volum, encara que és evident que el principal desencadenant són les sobrecàrregues i intervencions generades.

La històrica falta de sòl industrial a Alcoi, un dels nuclis primigenis de població en industrialitzar-se a la conca mediterrània, ha comportat a exercir en certs casos unes pressions sobre el territori donant lloc a la inestabilitat dels vessants. Tot i que els estudis previs proposaren estudis sobre esllavissades històriques, no es va frenar el desenvolupament d'un espai industrial de gran capacitat d'acollida per a les indústries locals que necessitaven unes naus de majors dimensions. El terreny escabros, front la insistència per tindre sòl industrial i no marxar a altres localitats, moltes zones foren reblides, desencadenant en problemes d'inestabilitats des del primer moment. Si a aquest factor natural del rocam se li afegixen els factors externs, com són les precipitacions i les temperatures, que generen la compactació i descompactació i canvis en el volum, i altre possible element intern, com són les aigües subterrànies i les seues surgències entre el contacte discordant, aquest talús presenta inestabilitats. Tanmateix, la intervenció antròpica agreuja aquest fenomen que no es detindrà fins que trobe el seu punt d'estabilitat. És per això que els clavills de tracció són el precedent de la producció d'un fenomen gravitacional de grans dimensions que s'està desenvolupant.

6. BIBLIOGRAFIA

- AVAMET – Associació Valenciana de Meteorologia. <https://www.avamet.org/>
- Ayala-Carcedo, F. J. (1990). *Estudio de riesgos naturales en la ciudad de Alcoi. Riesgo de avenidas, vulnerabilidad y riesgo sísmico*. Instituto Geológico y Minero de España.
- Ayala-Carcedo, F. J. (2002). *Análisis de riesgos por movimientos de ladera*. En Ayala-Carcedo, F. J. i Olcina Cantos, J. (Eds.), *Riesgos naturales*. Ariel, 379-409
- Círculo Industrial de Alcoi. Pluviòmetre. <https://www.circuloindustrial.net/pluvio.php>
- Crudens, D. M. i Varnes, D. J. (1996). Landslide Types and Processes. En Turner, A. K. i Schuster, R. L. (Eds.), *Landslides Investigation and Mitigation*. TRBNRC, National Academy Press: Washington, pp. 36-75. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0012825216302458>
- Gariano S. L., Guzzetti F. (2016). Landslides in a changing climate. *Earth-Science Reviews*, 162, 227- 252.
- Gariano S. L., et al (2022). Rainfall and landslide initiation. *Modeling, Measurement and Applications*, 427-450. https://www.researchgate.net/publication/358366295_Rainfall_and_landslide_initiation
- Giménez Font, P. i Marco Molina, J.A. (2011). Sobre els riscos naturals a la ciutat d'Alcoi. Sòsides i esllavissades en temps històrics. *Revista Afers*, 335-374
- Giménez Font, P. (2009). Cauces meandriformes y riesgos naturales en la cartografía histórica del Mediterráneo español. *Revista Mapping*, 133, 12-16. <https://rua.ua.es/dspace/handle/10045/13128>

- El Nostre Ciutat. (2022). Diez años temiendo que la ladera se les viniera encima... y ocurrió. <https://www.el-nostreciutat.com/es/diez-anos-temiendo-que-la-ladera-se-les-venida-encima-y-ocurrio/>
- La Roca, N. i Calvo Cases, A. (1989). Slope evolution by mass movements and surface wash. (Valls d'Alcoi, Alicante, Spain). *Catena Supplementband*, 95-102.
- Marco Molina, J.A. (1993). Rocas blandas y riesgos en el sur de la Comunidad Valenciana. *Investigaciones Geográficas*, 237-250. <https://rua.ua.es/dspace/handle/10045/520>
- Van Beek, R. (2002). Assessment of the influence of changes in land use and climate on landslide activity in a Mediterranean environment. Tesis doctoral. Universitat d'Utrecht.

Sistemas de Información Geográfica para una transición energética justa y eficiente. Resultados para el Mapa de Potencialidad de Energías Renovables en Andalucía (MAPER@I)

P. Díaz-Cuevas¹, Belén Pérez-Pérez², G. Orozco-Frutos³

¹ Departamento de Geografía Física y Análisis Geográfico Regional, C. Dña María de Padilla, 41004, Sevilla, España

² Departamento de Geografía Humana, Facultad de Filosofía y Letras, Campus Universitario de Cartuja, 18071 Granada, España.

³ Departamento de Geografía Física y Análisis Geográfico Regional, C. Dña María de Padilla, s/n, 41004, Sevilla, España

pilard@us.es, <https://orcid.org/0000-0003-0846-9930>

belenperez@ugr.es, <https://orcid.org/0000-0002-9780-2338>

gorozco1@us.es, <https://orcid.org/0000-0003-3129-282X>

RESUMEN El objetivo de este trabajo es analizar experiencias recientes en el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) para la localización óptima de centrales energéticas, identificando fortalezas y debilidades. Este análisis servirá de base para desarrollar un marco metodológico que permita un uso eficiente de los SIG en modelos de localización, aplicado en Andalucía en el contexto del Proyecto MAPER@I. Las conclusiones señalan cómo carecer de una estructura teórica clara en el uso de los SIG lleva a decisiones de planificación subóptimas. Es necesario explorar diferentes escenarios para reflejar las diversas realidades territoriales, considerando los modelos SIG una herramienta preliminar y no una solución definitiva. Además, se requiere un análisis más detallado de las áreas incompatibles y la participación de expertos que comprendan tanto la tecnología como el contexto territorial.

Palabras-clave: Sistemas de Información Geográfica, Energías renovables, Localización óptima, Marco conceptual.

1. INTRODUCCIÓN, OBJETIVOS Y JUSTIFICACIÓN

El Mapa de Potencialidad de Energías Renovables en Andalucía (MAPER@I) constituye un proyecto de investigación financiado por el Ministerio de Innovación Ciencia y Empresa en su convocatoria de Proyectos de Transición Ecológica y Transición Digital. Entre los principales objetivos se encuentra el desarrollo de modelos de localización para la identificación, en el territorio andaluz, de lugares óptimos para la instalación de centrales de energía eólica y solar. Es necesario reconocer que, aunque los SIGs son herramientas sumamente poderosas, han recibido críticas en algunas ocasiones debido a su vinculación con enfoques negativos en la planificación del uso del suelo, comúnmente conocidos como "planificación negativa" (van der Horst y Lozada-Ellison 2010; Pérez 2010; Deshaies & Herrero-Luque, 2015; entre otros). No obstante, los problemas mencionados suelen originarse, no por el uso de los SIG en sí, sino por la falta o inadecuación de un marco sólido que oriente la aplicación de estos (Díaz y Domínguez, 2015).

El objetivo de este trabajo consiste en analizar varias experiencias recientes en el uso de SIG para la localización óptima de centrales, prestando atención a las principales fortalezas y debilidades. Ello servirá como base para la generación de un marco metodológico que permita el uso eficiente de esta herramienta en el desarrollo de modelos de localización óptima de este tipo de centrales, que será probado en Andalucía en el contexto del Proyecto MAPER@I. Todo ello cobra, además, especial importancia, si se tiene en cuenta lo dispuesto en la reciente Directiva 2023/2413, donde a más tardar el 21 de febrero de 2026, los países deberán tener definidas las denominadas zonas de aceleración de renovables.

2. METODOLOGÍA Y FUENTES

Se ha realizado una revisión bibliográfica (2015-2024) de artículos sobre modelos de localización de energía

con SIG en Scopus y Web of Science. Los estudios con SIG son abundantes en la literatura. Además, las investigaciones más recientes suelen incluir una lista actualizada de modelos. Las referencias analizadas son:

- Parques eólicos: Latinopoulus et al. (2015); Höfer et al. (2016); Díaz- Cuevas et al. (2018 a,c); Potić et al. (2021); Zahedi et al. (2022); Moltames et al. (2022); Zalhaf et al. (2022); Bimenyimana et al. (2024).
- Paques solares (17): Tahri et al. (2015); Al Garni & Awasthi (2017); Aly et al. (2017); Hafeznia et al. (2017); Yushchenko et al. (2018); Yousefi et al. (2018); Díaz- Cuevas et al. (2018b); Shiraishi et al. (2019); Doorga et al. (2019); Mensour et al. (2019); Giamalaki et al. (2019); Çolak et al. (2019); Habib et al. (2020); Haddad et al. (2021); Romero-Ramos et al. (2023); Bawazir et al. (2023); Sahin et al. (2024a).
- Parques eólicos y solares (8): Watson & Hudson (2015); Ali et al. (2019); Shiraishi et al. (2019); Elka-deem et al. (2022); Harrucksteiner et al. (2023); Aghaloo et al. (2023); Sahin et al. (2024b).

3. RESULTADOS

3.1. Caracterización general.

El alcance geográfico de los estudios y las resoluciones aplicadas varían ampliamente, desde pequeñas regiones como Städteregion Aachen en Alemania (Höfer et al., 2016) con 707 km² de superficie, hasta grandes áreas, como la totalidad de los países de la CEDEAO en África Occidental (Yushchenko et al., 2018) con 5.114.162 km², o Arabia Saudí o Argelia (Al Garni & Awasthi, 2017; Haddad et al., 2021) con más de 2 millones de km². El tamaño del área de estudio es un dato fundamental, ya que será determinante en la selección y análisis de determinados criterios, que deben adaptarse a la escala del proyecto. Así, tratar criterios como el paisaje, la protección de la fauna o la aceptación social en grandes zonas de estudio puede conducir a resultados incoherentes, contradictorios e incompletos, como consecuencia de no trabajar a la escala adecuada. A pesar de la importancia que tienen en estos análisis la superficie del área de estudio y la resolución espacial (Martínez-Gordon et al., 2021) así como el sistema de referencia de coordenadas son varias las experiencias analizadas que no suministran esta información.

Respecto al tipo de energía analizada, predominan los estudios de localización óptima de plantas de energía solar o eólica frente a un menor número de estudios que exploran sistemas híbridos. Por lo general, los estudios de localización óptima para dos o tres tipos de centrales, analizan de manera individual la ubicación, no evaluando en ningún caso el potencial combinado, a excepción de Sahin et al. (2024). Por otro lado, en varias experiencias que analizan la localización óptima de centrales solares, no queda claro si se refieren a centrales fotovoltaicas o térmicas, a pesar de que los impactos que producen son muy diferentes y, por tanto, diferentes los criterios que deben tenerse en cuenta.

3.2. Metodologías SIG. Criterios y restricciones

Como primer paso, Figura 1, los estudios utilizan criterios restrictivos, para eliminar las zonas no aptas para la instalación solar o eólica. Estos criterios y restricciones derivan de una revisión de experiencias previas, de la planificación y legislación del área de estudio o de expertos en la tecnología a implantar (1.1). Posteriormente esos criterios son normalizados, reclasificados con valor 0 para las zonas incompatibles y valor 1 para las zonas compatibles (1.2). Por último, los mapas representativos de cada criterio son integrados (normalmente multiplicados entre sí), para dar lugar al mapa de áreas incompatibles (1.3). En un segundo paso, se tienen en cuenta distintos factores de idoneidad para clasificar las zonas según la misma, que provienen principalmente de experiencias previas o de expertos en la tecnología a implantar (2.1). La mayor parte de estos factores responden a aspectos tecnológicos, económicos, sociales y ambientales. Posteriormente estos factores son representados y reclasificados otorgando mayor puntuación a las áreas más idóneas (2.2). A los factores se les suele asignar un peso en función de su importancia relativa en la toma de decisiones (2.3). Posteriormente se multiplicará cada factor por su peso específico y se sumarán mediante combinación lineal ponderada (2.4). Por último, en la fase 3 se obtendrán las áreas con mayor idoneidad a partir de la integración del mapa de incompatibilidad y el mapa derivado de la aplicación de combinación lineal ponderada. Esta metodología es común en casi el 90% de los casos analizados, no obstante, hay varias diferencias en su aplicación que merecen ser comentadas.

El número de criterios de exclusión varía desde los 21 de Yushchenko et al. (2018) para el caso de los países ECOWAST a los cinco criterios de Harrucksteiner et al. (2023) para Mongolia. Ello depende principalmente de la existencia o no de información geoespacial de calidad en el ámbito de estudio. Así, en países como Argelia (Haddad et al., 2021), no está disponible la información oficial de libre acceso. En este caso los datos geoespaciales provienen de diversas fuentes gratuitas, con diferentes resoluciones y tamaño de píxel.

Por todo ello, el análisis de la calidad de la información y las aclaraciones sobre cómo se han gestionado e integrado los datos es necesario y conveniente. No obstante, rara vez estos procesos son descritos en la literatura analizada.

Respecto a las restricciones a aplicar sobre los criterios, estas se derivan directamente de trabajos previos realizados en diferentes contextos territoriales, ya que suele ser raro que los criterios de compatibilidad o las restricciones que les corresponden se definan en el marco jurídico de un territorio determinado (Díaz et al., 2018 a,b,c). Del mismo modo, suele no haber consenso entre las restricciones técnicas como la velocidad del viento, la insolación o la pendiente, que a priori no dependen de la legislación o planificación del área de estudio. Aplicar unas u otras restricciones puede suponer grandes cambios en el análisis de la potencialidad del territorio y se podría estar desechando a priori territorio apto para la implantación.

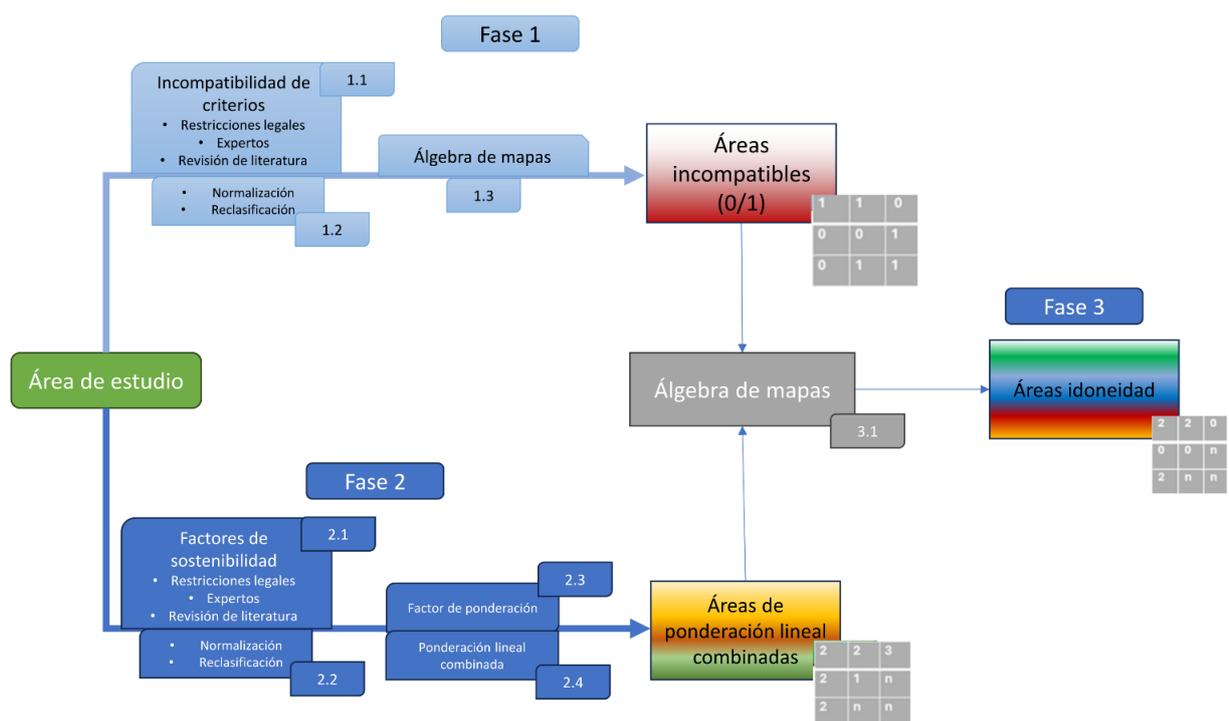


Figura 47. Metodología SIG-Multicriterio

Otro de los aspectos mencionables es la incorporación como restricción de la velocidad mínima de viento, o una radiación solar mínima. Esto tiene como principal inconveniente que las modificaciones de las tecnologías y sistemas utilizados en el aprovechamiento de los recursos pueden convertir en rentables emplazamientos que no lo eran cuando se realizó el estudio de localización (Schallenberg-Rodríguez & Notario-del Pino 2014) careciendo de datos de valoración de la incidencia ambiental del nuevo proyecto. Así por ejemplo en Díaz-Cuevas (2018c), se pone de manifiesto cómo el 33% de las turbinas ya instaladas en la región de estudio se situaban en zonas categorizadas por diversos autores como incompatibles debido al incumplimiento del criterio de velocidad del viento. Por tanto, la velocidad del viento no debería ser un criterio restrictivo, más bien debería ser tratado en la segunda etapa, como un factor de evaluación.

Es crucial no limitarse a una única perspectiva sobre el territorio, sino ofrecer un conjunto más amplio de alternativas mediante la definición de varios escenarios. Autores como Díaz-Cuevas et al. (2018b) propusieron dos escenarios distintos de incompatibilidad para la localización óptima de parques eólicos (el primero se fundamenta en el Principio de Precaución el segundo escenario, por su parte, se basa en las restricciones establecidas por la legislación y la planificación del área de estudio).

Otro de los aspectos comunes en casi todas las experiencias es el otorgar el valor 0 a las zonas incompatibles en cada criterio analizado y 1 para el resto. Posteriormente los autores utilizan la herramienta *álgebra de mapas* o alguna similar para multiplicar entre sí los mapas de incompatibilidad del área de estudio según cada criterio de exclusión. Si se asignara valor 0 a las zonas no excluidas y valor 1 a las zonas excluidas, y posteriormente procediésemos a la suma de las capas, el resultado final sería un ráster que clasificaría cada

celda en función del número de criterios que incumple y, aunque no constituye una operación compleja, sólo Díaz-Cuevas et al. (2018a) presenta este resultado. Esta sencilla operación sería de gran utilidad no sólo para la Administración encargada de integrar estas infraestructuras en el territorio, sino también para los propios promotores ya que, por lo general, se comprueba que las zonas que incumplen múltiples criterios suelen ser las que quedan excluidas de la implantación eólica a escalas de mayor detalle. Además, la aplicación de la herramienta de *combinación de mapas* permitiría conocer cuáles son los criterios que incumple una determinada zona, lo que sería de gran utilidad, ya que permitiría conocer el impacto de determinadas intervenciones sobre los mismos. De hecho, la actuación sobre ellos como, por ejemplo, ampliando el trazado de la red eléctrica (Díaz-Cuevas et al., 2021) o las carreteras, permitiría volver una zona incompatible en compatible (siempre que se cumpla con el resto de los requisitos).

Respecto a la identificación de zonas con mayor potencialidad para la implantación, esta se basa en primer lugar en la determinación de factores de evaluación que también varían en número (Höfer et al. (2016) consideran siete factores de idoneidad, mientras que Nasehi et al. (2016) utilizan 11). Estos factores se basan en estudios previos y en la opinión de expertos, incluso, al igual que en el caso de los criterios de exclusión, basándose en una revisión de la literatura (Tahri et al., 2015). Una vez seleccionados, los factores se normalizan y representan espacialmente. Posteriormente se procede a la ponderación de estos. Una de las técnicas más comúnmente utilizadas para esta tarea es el Análisis de Jerarquías Analíticas (AHP) propuesto por Saaty (1980), que entre otros aspectos garantiza que los juicios realizados sean consistentes mediante el cálculo de la razón de consistencia. No obstante, una de las principales críticas a estos trabajos es la ambigüedad en cuanto a cómo se obtienen las ponderaciones y a si la calificación de los criterios es coherente. Entre algunos ejemplos destacan Tahri et al. (2015) o Yousefi et al. (2018), quienes mencionan sólo que un grupo de expertos fue consultado, pero no determina cuántos, ni describe el expertise de estos; Montalmes (2022) no manifiesta si quiera la razón de consistencia. También existen ejemplos en lo que son los mismos autores los que determinan los pesos (Latinopoulus et al., 2015) o el caso de Bimenyimana et al. (2024) que utiliza las mismas ponderaciones para todos los países de ECOWAST. Por otro lado, experiencias como Haddad et al. (2021), que incorpora 12 expertos para la evaluación de pares de criterios, o Bawazir et al. (2023) que incorpora 15 expertos, lo cual complica las operaciones de cálculo, si bien, el propio Saaty abordó esta cuestión concluyendo que un mayor número de expertos no garantiza una mayor calidad, fiabilidad o imparcialidad de los resultados (Saaty & Özdemir, 2014).

En todos los análisis realizados, la presencia de recurso eólico y solar en cantidad y calidad suficiente obtienen la mayor ponderación. No obstante, en zonas con abundantes recursos solares, la distancia a las líneas de transporte puede considerarse un factor más importante que la irradiancia solar. Esta idea es recogida por Yushchenko et al. (2018) y Díaz-Cuevas et al. (2021), donde se pone de manifiesto además en la necesidad de que los expertos posean conocimientos en la tecnología, pero también en el área de estudio.

Una vez establecida la ponderación, generalmente el mapa de potencialidad e idoneidad final mediante Combinación Lineal Ponderada. Por último, algunos autores realizan análisis de sensibilidad, generalmente variando los pesos de los criterios en un intervalo definido.

4. CONCLUSIONES

En la planificación y gestión de las energías renovables, los SIG han sido una herramienta ampliamente utilizada para la toma de decisiones. No obstante, sin una estructura teórica bien definida, es posible que la aplicación de los SIGs en los modelos de localización óptimas de centrales de energía renovable sea malinterpretadas o utilizadas incorrectamente, lo que puede llevar a decisiones de planificación subóptimas. Se deben llevar a cabo diferentes análisis basados en diferentes escenarios para capturar la variabilidad de las realidades territoriales y considerar los modelos SIG como una herramienta preliminar, no como una solución definitiva. Además, se debe realizar un análisis más profundo de las zonas consideradas incompatibles, y asegurar que la toma de decisiones involucre a expertos que no solo dominen la tecnología, sino que también comprendan el área de estudio en su totalidad.

AGRADECIMIENTOS

La publicación es parte del Proyecto TED2021-129484A-I00, financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por la Unión Europea "NextGenerationEU"/PRTR.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Aghaloo, K., Ali, T., Chiu, Y. R., & Sharifi, A. (2023). Optimal site selection for the solar-wind hybrid renewable energy systems in Bangladesh using an integrated GIS-based BWM-fuzzy logic method. *Energy Conversion and Management*, 283, 116899. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.116899>
- Al Garni H, Awasthi A (2017). Solar PV power plant site selection using a GIS-AHP based approach with application in Saudi Arabia. *Appl Energy*, 206, 1225–1240. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.024>
- Ali, S., Taweekun, J., Techato, K., Waewsak, J., & Gyawali, S. (2019). GIS based site suitability assessment for wind and solar farms in Songkhla, Thailand. *Renewable Energy*, 132, 1360-1372. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.09.035>
- Aly, A., Jensen, S. S., & Pedersen, A. B. (2017). SOLAR power potential of Tanzania: Identifying CSP and PV hot spots through a GIS multicriteria decision making analysis. *Renewable Energy*, 113, 159-175.
- Baris, K.B., Bahadir, S., Ulucan, A., Umur, M. (2015). A GIS-based multiple criteria decision analysis approach for wind power plant site selection. *Util. Policy*, 3, 86–96. <https://doi.org/10.1016/j.jup.2015.06.001>
- Bawazir, R. O., Çetin, N. S., & Fadel, W. (2023). Optimum PV distributed generation based on grid and geographical area: A case study of Aden governorate, Yemen. *Energy Conversion And Management*, 297, 117703. <http://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117703>
- Bimenyimana, S., Wang, C., Asemota, G. N. O., Ihirwe, J. P., Tuyizere, M. N., Mwizerwa, F., ... & Abiyese, M. (2024). Geospatial Analysis of Wind Energy Siting Suitability in the East African Community. *Sustainability*, 16(4), 1514. <https://doi.org/10.3390/su16041514>
- Colak, H. E., Memisoglu, T., & Gercek, Y. (2020). OPTIMAL site selection for solar photovoltaic (PV) power plants using GIS and AHP: A case study of Malatya Province, Turkey. *Renewable Energy*, 149, 565-576. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.12.078>
- Deshaies, M., Herrero-Luque, D. (2015). Wind energy and natural parks in european countries (Spain, France and Germany). In Frolova, M., Prados, M.J., Nadaï, A. (Eds). *Renewable Energies and European Landscapes: Lessons from Southern European Cases* (pp. 217-233). Dordrecht, Springer. http://doi.org/10.1007/978-94-017-9843-3_15
- Díaz-Cuevas, P., & Domínguez-Bravo, J. (2015). GIS, territory, and landscape in renewable energy management in Spain. In Frolova, M., Prados, M.J., Nadaï, A. (eds). *Renewable energies and European landscapes: lessons from Southern European cases* (pp. 279-294). Dordrecht, Springer. http://doi.org/10.1007/978-94-017-9843-3_15
- Díaz-Cuevas, M.P., Biberacher, M., Domínguez-Bravo, J., Schardinger, I. (2018a). Developing a wind energy potential map on a regional scale using GIS and multi-criteria decision methods: The case of Cadiz (south of Spain). *Clean Technologies and Environmental Policy*, 20, 1167–1183. <http://doi.org/10.1007/s10098-018-1539-x>
- Díaz-Cuevas, P., Camarillo-Naranjo, J. M., Pérez-Alcántara, J. P. (2018b). Relational spatial database and multi-criteria decision methods for selecting optimum locations for photovoltaic power plants in the province of Seville (southern Spain). *Clean Technologies and Environmental Policy*, 20(8), 1889-1902. <http://doi.org/10.1007/s10098-018-1587-2>
- Díaz-Cuevas, P. (2018c). GIS-based methodology for evaluating the wind-energy potential of territories: A case study from Andalusia (Spain). *Energies*, 11(10), 2789. <http://doi.org/10.3390/en1102789>
- Díaz-Cuevas, P., Domínguez-Bravo, J., & Prieto-Campos, A. (2019). Integrating MCDM and GIS for renewable energy spatial models: assessing the individual and combined potential for wind, solar and biomass energy in Southern Spain. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 21, 1855-1869. <http://doi.org/10.1007/s10098-019-01754-5>
- Díaz-Cuevas, P., Haddad, B., & Fernandez-Nunez, M. (2021). Energy for the future: Planning and mapping renewable energy. The case of Algeria. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 47, 101445. <http://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101445>
- Doorga, J. R., Rughooputh, S. D., & Boojhawon, R. (2019). Multicriteria GIS-based modelling technique for identifying potential solar farm sites: A case study in Mauritius. *Renewable Energy*, 133, 1201-1219. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.08.105>

- Elkadeem, M. R., Younes, A., Mazzeo, D., Jurasz, J., Campana, P. E., Sharshir, S. W., & Alaam, M. A. (2022). GEOSPATIAL-ASSISTED multi-criterion analysis of solar and wind power geographical-technical-economic potential assessment. *Applied Energy*, 322, 119532. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119532>
- Giamalaki, M., & Tsoutsos, T. (2019). SUSTAINABLE siting of solar power installations in Mediterranean using a GIS/AHP approach. *Renewable Energy*, 141, 64-75. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.03.100>
- Habib, S. M., Suliman, A. E. R. E., Al Nahry, A. H., Abd El Rahman, E. N. (2020). Spatial modeling for the optimum site selection of solar photovoltaics power plant in the northwest coast of Egypt. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 18, 100313. <http://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100313>
- Haddad, B., Díaz-Cuevas, P., Ferreira, P., Djebli, A., Pérez, J. P. (2021). Mapping concentrated solar power site suitability in Algeria. *Renewable Energy*, 168, 838-853. <http://doi.org/10.1016/j.renene.2020.12.081>
- Harrucksteiner, A., Thakur, J., Franke, K., & Sensfuss, F. (2023). A geospatial assessment of the techno-economic wind and solar potential of Mongolia. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 55, 102889. <http://doi:10.1016/j.seta.2022.102889>
- Höfer, T., Sunak, Y., Siddique, H., Madlener, R. (2016). Wind farm siting using a spatial Analytic Hierarchy Process approach: A case study of the Städtereion Aachen. *Appl. Energy*, 163, 222-243. <http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.138>
- Latinopoulos, D., Kechagia, K. (2015). A GIS-based multi-criteria evaluation for wind farm site selection. A regional scale application in Greece. *Renew Energy*, 78, 550-560. <http://doi.org/10.1016/j.renene.2015.01.041>
- Martínez-Gordón, R., Morales-España, G., Sijm, J., Faaij, A. P. C. (2021). A review of the role of spatial resolution in energy systems modelling: Lessons learned and applicability to the North Sea region. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 141, 110857. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110857>
- Mensour, O. N., El Ghazzani, B., Hlimi, B., & Ihlal, A. (2019). A GEOGRAPHICAL information system-based multi-criteria method for the evaluation of solar farms locations: A case study in Souss-Massa area, southern Morocco. *Energy*, 182, 900-919. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.06.063>
- Moltames, R., Naghavi, M. S., Silakhori, M., Noorollahi, Y., Yousefi, H., Hajiaghaei-Keshteli, M., & Azizimehr, B. (2022). Multi-criteria decision methods for selecting a wind farm site using a geographic information system (GIS). *Sustainability*, 14(22), 14742. <http://doi.org/10.3390/su142214742>
- Nasehi, S., Karimi, S., Jafari, H. (2016). Application of fuzzy GIS and ANP for wind power plant site selection in East Azerbaijan Province of Iran. *Computational Research Progress in Applied Science & Engineering*, 2(03), 116-124. Retrieved from https://jms.procedia.org/archive/CRPASE_169/CRPASE_procedia_2016_2_3_5.pdf
- Pérez, B. P. (2010). Perspectivas de desarrollo y ordenación territorial y paisajística de la energía eólica offshore en España. *Nimbus: Revista de Climatología, Meteorología y Paisaje*, 25, 175-186.
- Potić, I., Joksimović, T., Milinčić, U., Kićović, D., & Milinčić, M. (2021). WIND energy potential for the electricity production-Knjaževac Municipality case study (Serbia). *Energy Strategy Reviews*, 33, 100589. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2020.100589>
- Romero-Ramos, J. A., Gil, J. D., Cardemil, J. M., Escobar, R. A., Arias, I., & Pérez-García, M. (2023). A GIS-AHP approach for determining the potential of solar energy to meet the thermal demand in southeastern Spain productive enclaves. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 176, 113205. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113205>
- Saaty, T.L. (1980), *The Analytic Hierarchy Process*, McGraw-Hill, New York.
- Saaty, T. L., & Özdemir, M. S. (2014). How many judges should there be in a group? *Annals of Data Science*, 1, 359-368. <https://doi.org/10.1007/s40745-014-0026-4>
- Sahin, G., Akkus, I., Koc, A., & van Sark, W. (2024). Multi-criteria solar power plant siting problem solution using a GIS-Taguchi loss function-based interval type-2 fuzzy approach: The case of Kars Province/Turkey. *Heliyon*, 10(10). <http://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e30993>
- Şahin, G., Koç, A., & van Sark, W. (2024). MULTI-CRITERIA decision making for solar power-Wind power plant site selection using a GIS-intuitionistic fuzzy-based approach with an application in the Netherlands. *Energy Strategy Reviews*, 51, 101307. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2024.101307>

- Schallenberg-Rodríguez, J., & Notario-del Pino, J. (2014). Evaluation of on-shore wind techno-economical potential in regions and islands. *Applied Energy*, 124, 117-129. <http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.02.050>
- Shiraishi, K., Shirley, R. G., & Kammen, D. M. (2019). GEOSPATIAL multi-criteria analysis for identifying high priority clean energy investment opportunities: A case study on land-use conflict in Bangladesh. *Applied Energy*, 235, 1457-1467. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.10.123>
- Tahri M, Hakdaoui M, Maanan M (2015) The evaluation of solar farm locations applying geographic information system and multi-criteria decision-making methods: case study in southern Morocco. *Renew Sustain Energy Rev*, 51, 1354–1362. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.054>
- Van der Horst, D., Lozada-Ellison, L. M. (2010). Conflicto entre las energías renovables y el paisaje: siete mitos y la propuesta de manejo adaptativo y colaborativo. *Nimbus: Revista de Climatología, Meteorología y Paisaje*, 25-26: 231-251. Retrieved from <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/3358577.pdf>
- Watson, J.J.W.; Hudson, M.D. (2015) Regional Scale wind farm and solar farm suitability assessment using GIS-assisted multi-criteria evaluation. *Landsc. Urban Plan*, 138, 20–31. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.02.001>
- Yousefi, H., Hafeznia, H., & Yousefi-Sahzabi, A. (2018). Spatial site selection for solar power plants using a gis-based boolean-fuzzy logic model: A case study of Markazi Province, Iran. *Energies*, 11(7), 1648. <http://doi.org/10.3390/en11071648>
- Yushchenko, A., de Bono, A., Chatenoux, B., Patel, M. K., Ray, N. (2018). GIS-bases assessment of photovoltaic (PV) and concentrated solar power (CSP) generation potential in West Africa. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 2088-2103. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.021>
- Zahedi, R., Ghorbani, M., Daneshgar, S., Gitifar, S., & Qezelbigloo, S. (2022). POTENTIAL measurement of Iran's western regional wind energy using GIS. *Journal of Cleaner Production*, 330, 129883. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129883>
- Zalhaf, A. S., Elboshy, B., Kotb, K. M., Han, Y., Almaliki, A. H., Aly, R. M., & Elkadeem, M. R. (2021). A HIGH-RESOLUTION wind farms suitability mapping using GIS and fuzzy AHP approach: A national-level case study in Sudan. *Sustainability*, 14(1), 358. <https://doi.org/10.3390/su14010358>

Análisis espacial de la accesibilidad en Extremadura y su relación con la despoblación

A. Nieto Masot¹, J.A. Gutiérrez Gallego¹, J.M. Pérez Pintor¹

¹ Instituto Universitario de Investigación para el Desarrollo Territorial Sostenible (INTERRA), Universidad de Extremadura.

ananieto@unex.es; <https://orcid.org/0000-0001-9301-8637>

jaqutier@unex.es; <https://orcid.org/0000-0002-2375-7087>

jimperpin@unex.es; <https://orcid.org/0000-0002-7714-5174>

RESUMEN: El proceso de despoblación de las zonas rurales europeas en territorios como Extremadura, es un enorme reto y constituye uno de los temas de mayor actualidad. Esta dinámica está íntimamente ligada a los procesos migratorios rural-urbano, fundamentados en la búsqueda de nuevas oportunidades laborales y mejores condiciones de vida. En este trabajo, se ha realizado un estudio para comprobar si la cercanía a los principales núcleos de población de Extremadura, como centros que ofertan mayores oportunidades laborales está mitigando la despoblación en sus áreas de influencia. Se estudia este fenómeno desde la perspectiva geográfica a nivel municipal.

La metodología empleada se centra en analizar la accesibilidad a la población y para ello, se han elaborado dos indicadores de accesibilidad, el de accesibilidad absoluta y el de accesibilidad relativa. En este sentido, como novedad, la aportación que se presenta en este estudio, se basa en el uso de un modelo dinámico y abierto, utilizando todas las carreteras disponibles en la región y en las áreas fronterizas de Portugal. Se emplea la API de Nominatim para calcular los tiempos de viaje, considerando datos estadísticos en tiempo real sobre la ocupación de la vía, el estado de las carreteras y las condiciones urbanas. Esta metodología permite obtener valores más precisos, adaptados a diferentes modos de desplazamiento y horarios. Con este estudio se pretende avanzar en el diagnóstico de los principales problemas que afectan a la población, identificando territorios con mayor debilidad en oferta laboral y su relación con la despoblación, en definitiva, facilitando herramientas que permitan optimizar la planificación territorial.

Palabras-clave: despoblación, accesibilidad, análisis de redes

1. INTRODUCCIÓN

La concentración urbana, particularmente en Europa y las regiones más desarrolladas del mundo, están ocasionando procesos de despoblación de amplias regiones rurales, con consecuencias negativas económicas, sociales y ambientales. La población rural, que fue muy estable durante siglos en el contexto de una economía de subsistencia agraria, se está vaciando debido a una distribución desigual de la tierra y su producción, escasa rentabilidad económica con una diversificación muy limitada y problemas de estabilidad laboral (Macdonald et al, 2000), lo que provoca que sus residentes migren hacia ciudades que centralizan servicios y ofrecen mayores oportunidades de acceso al empleo (Gurría y Nieto, 2020). Estos procesos migratorios, sobre todo de la población joven y cualificada está ocasionando en estas zonas rurales un deterioro y dinámicas demográficas regresivas debido a que presentan altas tasas de envejecimiento, masculinización o bajo crecimiento demográfico (Slack and Jensen, 2020; Cejudo y Navarro, 2023). El abandono de formas tradicionales de hábitats y modos de vida, y, a largo plazo, el desmantelamiento de servicios e instalaciones, el deterioro de infraestructuras o el abandono ambiental y patrimonial (Jhonson and Lichter, 2019), está provocando la desaparición de multitud de pequeños asentamientos en todo el territorio, lo que lleva a una desarticulación territorial (Nieto et al., 2017; Nieto-Calmaestra, 2021).

Debido a estas problemáticas numerosos estudios desde la geografía o la ordenación territorial tienen como objetivo diseñar estrategias que promuevan un desarrollo sostenible y equilibrado en todos sus territorios, debido al patrón desigual de ocupación territorial, ya que las áreas urbanas, especialmente las grandes ciudades, continúan albergando a la mayoría de la población, mientras que un considerable número de zonas

rurales, ubicadas en lugares remotos o lejos de los centros urbanos, están en declive demográfico progresivo (Nieto y Gurría, 2024). También desde diferentes instituciones como la Unión Europea (UE) se promueve una política territorial con un sistema policéntrico de ciudades medianas interconectadas, capaces de ofrecer servicios, empleo e ingresos no solo para sus habitantes, sino también para los de su entorno rural, contribuyendo así a la estabilización de esta población con iniciativas como ESPON (2017), Libro Verde o la ATE (2007 y 2011).

En este trabajo, se ha realizado un estudio para comprobar si la cercanía a los principales núcleos de población de una región eminentemente rural como es el caso de Extremadura (Gurría y Nieto, 2020) está mitigando la despoblación en sus áreas de influencia, como centros que ofertan mayores oportunidades laborales. La investigación analiza la accesibilidad a la población y se han empleado dos indicadores de accesibilidad, como el de accesibilidad absoluta y la accesibilidad relativa. La novedad metodológica que se presenta en este estudio es el uso de un modelo dinámico y abierto, utilizando todas las carreteras disponibles en la región y en las áreas fronterizas de Portugal con la API de Nominatim. Por ello, se obtendrán tiempos de viaje, con datos estadísticos en tiempo real sobre la ocupación de la vía, el estado de las carreteras y las condiciones urbanas. Podemos así obtener valores más precisos, adaptados a diferentes modos de desplazamiento y horarios. Con este estudio se pretende avanzar en el diagnóstico de los principales problemas que afectan a la despoblación, identificando territorios con mayor debilidad demográfica y que no están siendo favorecidos por proximidad a núcleos con mayor oferta laboral que puede mitigar su abandono. Se contribuye al empleo de nuevas herramientas que permitan optimizar la planificación territorial.

2. METODOLOGÍA

La fuente principal de información de los cálculos de accesibilidad presentados en esta comunicación proviene de la API (Interfaz de Programación de Aplicaciones) de Nominatim. A través de esta API, se han podido localizar los orígenes y los destinos de los desplazamientos, así como calcular el coste en tiempo y distancia entre ellos. De esta manera, se ha podido construir, sobre un modelo dinámico, la matriz de costes de desplazamiento origen-destino de todos los municipios de Extremadura. Estos datos han permitido un cálculo riguroso y actualizado de las variables de accesibilidad que se describen en este apartado.

Como es sabido, OpenStreetMap (OSM) es un proyecto colaborativo que crea y proporciona datos geográficos gratuitos y editables de todo el mundo. Es similar a una Wikipedia de mapas, donde cualquier persona puede contribuir añadiendo y editando información espacial. Nominatim es una herramienta que utiliza los datos de OSM para encontrar ubicaciones por nombre y dirección (geocodificación) y también para hacer lo inverso, es decir, encontrar una dirección a partir de una ubicación específica (geocodificación inversa).

Una API es un conjunto de reglas y definiciones que permiten a diferentes aplicaciones comunicarse entre sí. Las APIs permiten que los desarrolladores utilicen funcionalidades de otros programas o servicios sin tener que escribir el código desde cero. En esencia, una API actúa como un intermediario que permite que dos aplicaciones hablen entre sí.

Dentro de las funciones de Nominatim, además de la geocodificación directa e inversa, se encuentra el cálculo de costes de desplazamiento. Aunque Nominatim en sí no calcula los costes de desplazamiento, se puede integrar con otras herramientas y servicios que utilizan sus datos de geocodificación para calcular rutas y estimar costes de viaje en función de la distancia y el tiempo.

Para alcanzar el objetivo de esta comunicación, que es determinar la accesibilidad de los municipios de Extremadura, se han calculado dos indicadores clásicos: la accesibilidad absoluta y la accesibilidad relativa.

La accesibilidad absoluta mide la facilidad con la que un municipio puede conectarse con el resto, teniendo en cuenta su ubicación geográfica. Este indicador es importante para evaluar el desarrollo regional, ya que la distribución territorial no puede ignorarse (Gutiérrez et al., 1993). Se calcula a través del tiempo medio ponderado que se tarda en ir de un municipio al resto de la región, ponderando el tiempo por la población de cada lugar. Este indicador revela el nivel de centralidad o periferia de los municipios.

Por otro lado, la accesibilidad relativa compara el tiempo de desplazamiento real de un municipio a los demás con el tiempo que se tardaría si se pudiera viajar en línea recta por una vía de alta capacidad (autovía a 120 km/h). También se pondera por la población. Este indicador es muy sensible al estado de las infraestructuras y busca eliminar el efecto de la ubicación geográfica, resaltando más los efectos de la oferta de infraestructuras sobre la accesibilidad (Mora et al., 2003). En resumen, la accesibilidad relativa mide el índice de rodeo, comparando el tiempo real de viaje (calculado mediante la API de Nominatim) con el tiempo ideal, basado en la distancia directa entre origen y destino a una velocidad de 120 km/h.

3. RESULTADOS

En la Figura 1, utilizando la accesibilidad absoluta, se ha realizado una clasificación basada en la distribución de los valores de la muestra, agrupando a 77 municipios en cada clase. La primera franja, de accesibilidad muy buena, se sitúa en la zona central de Extremadura, donde los valores son elevados que abarcan al 54 % de la población. En esta área se encuentran los principales municipios urbanos de la región, como las capitales de provincia Badajoz y Cáceres, la capital autonómica Mérida, y al norte, Plasencia; en el este, la conurbación de Don Benito-Villanueva de la Serena. En esta zona central se observa una tendencia hacia la frontera con Portugal, debido a la influencia de la ciudad de Badajoz, extendiéndose a lo largo de la carretera nacional EX-100, que une las dos capitales provinciales. También se aprecia la influencia de las dos autovías que atraviesan la región: la A-66 o Ruta de la Plata, que va de norte a sur, y la A-5, la autovía hacia Madrid.

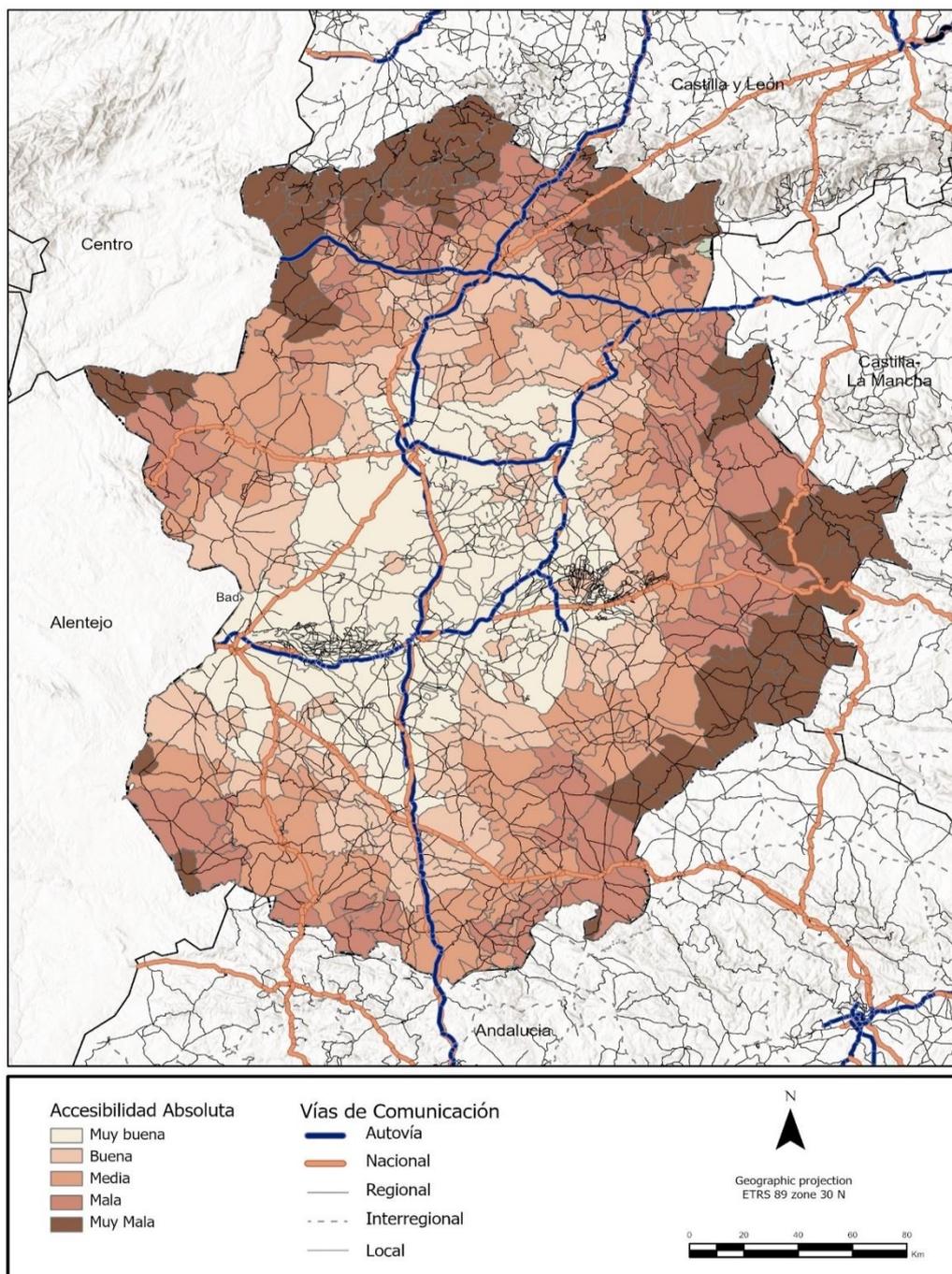


Figura 48. Accesibilidad absoluta de la Comunidad Autónoma española de Extremadura.

En la siguiente franja, de accesibilidad buena, se sitúa un porcentaje considerable de la población (el 13 % de la población). Estos municipios se encuentran en los alrededores de las carreteras nacionales y, en menor medida, en sus áreas de influencia, a distancias de 10 a 20 km. Entre las carreteras nacionales se destacan la N-432, que une Badajoz con Granada, Huelva y Córdoba; y en la provincia de Cáceres, la carretera que conecta con la frontera portuguesa a través de Castelo Branco.

A medida que nos alejamos de la zona central, la accesibilidad absoluta disminuye, y encontramos los municipios más despoblados, la mayoría con menos de 1.000 habitantes que suponen el 33 % de la población extremeña. Estos presentan una accesibilidad menos óptima, considerada como muy mala, de manera casi uniforme, hasta llegar a zonas fronterizas donde se define como deficiente, destacando las áreas limítrofes con Castilla-La Mancha y Andalucía al este, y con Castilla y León y Portugal al norte.

El indicador de accesibilidad relativa (Figura 2) permite analizar la calidad del trazado viario, ya que mide la "calidad" de las infraestructuras, es decir, su grado de aproximación a una línea recta. Esto se logra al comparar la impedancia ideal (en línea recta) con la real (considerando las desviaciones de los trazados actuales). Los resultados obtenidos son bastante irregulares y difieren de los de la accesibilidad absoluta. Los valores más altos se encuentran en las zonas cercanas a las cabeceras comarcales y en los trazados de las dos principales vías de comunicación de la región: la Autovía de la Ruta de la Plata, que va de norte a sur, y el recorrido de la A-5 hasta llegar a la ciudad de Badajoz.

A medida que se alejan de estas vías principales, la accesibilidad empeora, especialmente en la frontera con Portugal y en los límites con ambas Castillas, en las áreas montañosas de la provincia de Cáceres (Sierra de Gata, Las Hurdes, Villuercas-Ibores) y en el este de la provincia de Badajoz, en comarcas como La Campiña, La Serena y La Siberia, que colindan con Castilla-La Mancha. Estos resultados evidencian que, aunque el sistema de transporte extremeño ha mejorado significativamente en las últimas décadas, aún es posible optimizar las infraestructuras para mejorar la accesibilidad en muchos municipios de la región.

La accesibilidad relativa, al neutralizar el efecto de la localización geográfica, refleja de manera más clara la distribución espacial de las infraestructuras. En el caso de Extremadura, se constata que aún está lejos de alcanzar un modelo ideal, con una excesiva dependencia de las dos autovías y de las carreteras nacionales que conectan los principales municipios urbanos de la región.

4. CONCLUSIONES

En líneas generales, el proceso de despoblación alcanzado en determinados territorios, especialmente aquellos con mayor índice de ruralidad, adquiere problemáticas con un marcado carácter estructural que dificultan en gran medida la aplicación de medidas correctoras que consigan reducir su impacto sobre el territorio. En este sentido, es prioritario avanzar en la búsqueda de nuevas metodologías que al menos permitan mitigar el impacto de esta nueva realidad sociodemográfica cada vez más extendida. En el caso que nos ocupa, esta contribución analiza el caso aplicado específicamente a la Comunidad Autónoma de Extremadura, localizada en el ámbito periférico europeo del suroeste de la península ibérica, mediante el uso de herramientas basadas en tecnologías de la información geográfica, con la finalidad de evaluar si la proximidad a los núcleos con mayor tamaño poblacional, en regiones con elevados índices de ruralidad, consigue frenar el proceso de despoblación de los municipios localizados en su área de influencia, al disponer de una oferta laboral más amplia y dinámica en su entorno más próximo.

A tenor de los resultados alcanzados, se pone de manifiesto como el uso de metodologías basadas en aplicaciones de análisis espacial de carácter dinámico, como ha sido este caso la principal novedad aportada, mediante la API de Nominatim, permite avanzar en una planificación territorial más efectiva, considerando las diferentes oportunidades de los distintos núcleos poblacionales, en una realidad cambiante dentro de un contexto global muy competitivo.

No obstante, debe destacarse que este trabajo supone un primer acercamiento, a partir del cálculo de dos variables de análisis prioritarias como son la accesibilidad absoluta y relativa, respectivamente, en un contexto socioeconómico donde los tiempos de desplazamiento entre los diferentes lugares suponen un papel cada vez más destacado a la hora de fijar tanto los lugares de residencia, así como de las principales actividades de carácter productivo, condicionando de manera directa la red de asentamientos.

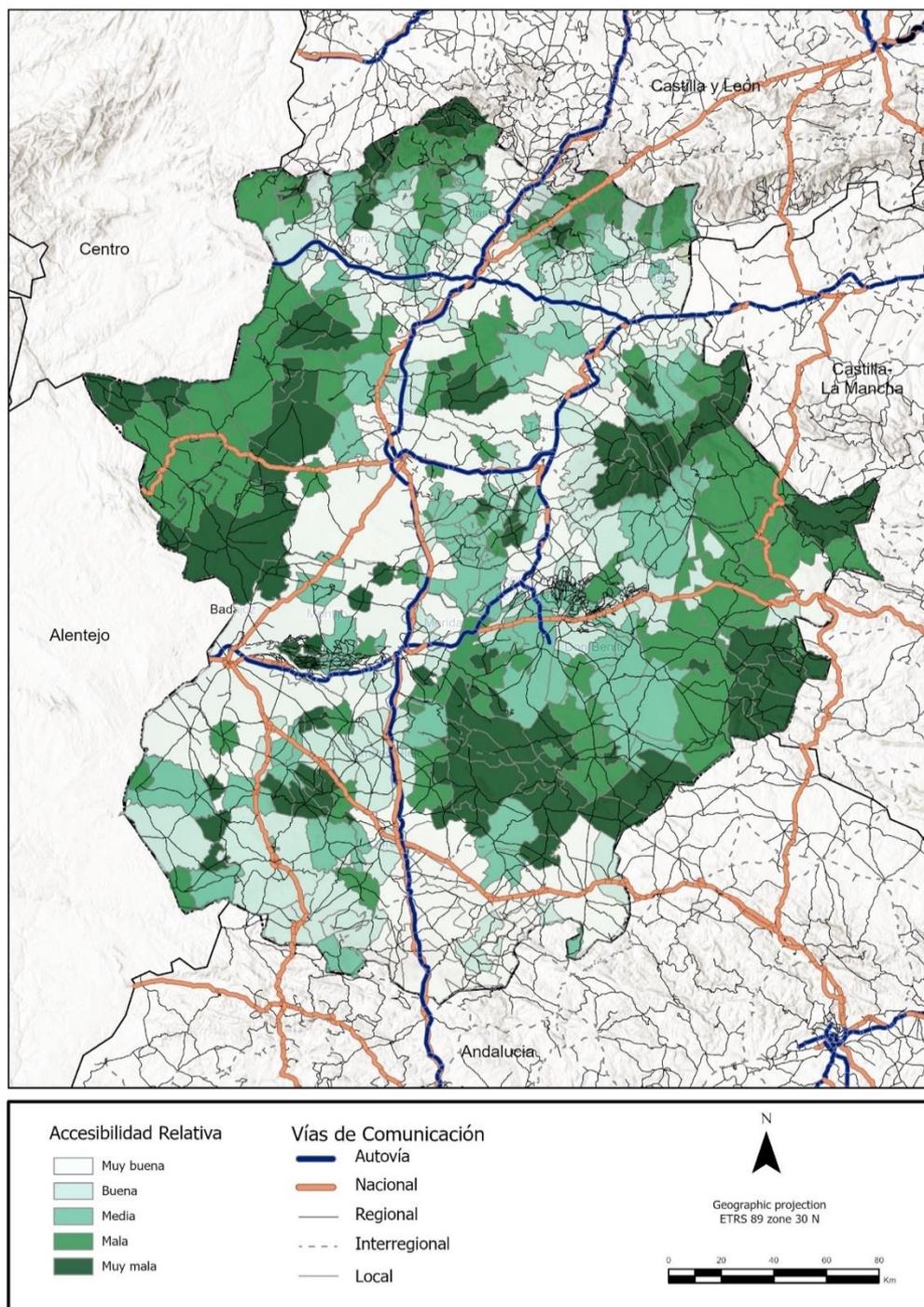


Figura 49. Accesibilidad relativa de la Comunidad Autónoma española de Extremadura.

5. BIBLIOGRAFÍA

Cejudo, E.; Navarro, F.A. (2023). *Despoblación y Mundo Rural Europeo Mediterráneo: El Caso de Andalucía*. Tirant lo Blanc, Humanidades: Madrid, España.

Comunidades Europeas (2008). *Libro Verde Sobre la Cohesión Territorial. Convertir la Diversidad Territorial en un Punto Fuerte*. Comunicación de la Comisión al Consejo, al Parlamento Europeo, al Comité de las Regiones y al Comité Económico y Social Europeo COM (2008) 616 Final; European Commission: Bruselas, Belgium.

- ESPON (2017). Shrinking Rural Regions in Europe; European Union: Bruselas, Belgium. Available online: <https://www.espon.eu/sites/default/files/attachments/ESPON%20Policy%20Brief%20on%20Shrinking%20Rural%20Regions.pdf> (accessed on 5 January 2024).
- European Union (2011). *ATE. Agenda Territorial Europea 2020. Hacia una Europa Integradora, Inteligente y Sostenible de Regiones Diversas*; European Union: Bruselas, Belgium, 2011.
- Gurría Gascón, J.L.; Nieto Masot, A. (2020). Rururban Partnerships: Urban Accessibility and Its Influence on the Stabilization of the Population in Rural Territories (Extremadura, Spain). *Land*, 9, 254. <https://doi.org/10.3390/land9080254>
- Gutiérrez, Puebla J. and Monzón de Cáceres, A. (1993). La accesibilidad a los centros de actividad económica antes y después del plan director de Infraestructuras. *Cytet*, 97(99), 385–395. <https://recyt.fecyt.es/index.php/CyTET/article/download/83892/61938/>
- Johnson, K.M. and Lichter, D.T. (2019): Rural Depopulation: Growth and Decline Processes over the Past Century. *Rural Sociol.*, 84, 3–27. <https://doi.org/10.1111/ruso.12266>
- MacDonald, D.; Crabtree, J.R.; Wiesinger, G.; Dax, T.; Stamou, N.; Fleury, P.; Gutierrez Lazpita, J. and Gibon, A. (2000): Agricultural Abandonment in Mountain Areas of Europe: Environmental Consequences and Policy Response. *J. Environ. Manag.*, 59, 47–69. <https://doi.org/10.1006/jema.1999.0335>.
- Mora, J., Nogales, J.M., Gutiérrez, J.A. y Cortés, T. (2003): “Aplicación de técnicas SIG en la aplicación del transporte por carretera en Extremadura (España)”. *Finisterra*. vol. XXXVIII, no 75, p. 67-83.
- Nieto Masot, A.; Engeldo Moriche, A. y Cárdenas Alonso, G. (2017): Análisis espacial de la división comarcal en áreas rurales de baja densidad demográfica. *Papeles de Geografía*, 63, pp. 113-132, DOI: <http://dx.doi.org/10.6018/geografia/2017/284161>.
- Nieto Masot, A. and Gurría Gascón, J.L. (2024). Sustainable Rural Development: Strategies, Good Practices and Opportunities (Second Edition). *Land*, 13, 104. <https://doi.org/10.3390/land13010104>
- Nieto-Calmaestra, J.A. (2021): Despoblación y Despoblamiento En La Provincia de Granada (España), 1991–2020. *J. Depopulation Rural. Dev. Stud.*, 33, 215–247. DOI: <https://10.4422/ager.2021.14>
- Slack, T. and Jensen, L. (2020): The Changing Demography of Rural and Small-Town America. *Popul. Res. Policy Rev.* 39, 775–783. <https://doi.org/10.1007/s11113-020-09608-5>

5. GESTIÓN, INFRAESTRUCTURAS Y TECNOLOGÍAS EMERGENTES EN TIG. FUTURO DE LAS TIG Y DESAFÍOS ACTUALES

Integración de Parcelas del Inventario Forestal Nacional y Límites Municipales Mediante SIG y Tecnologías Semánticas

N. Crespo-Lera^{1,2}, G. Vega-Gorgojo^{1,2}, JM. Giménez-García^{1,2}, F. Bravo¹, I. Ruano¹.

¹ SMART ecosystems research group, Instituto de Investigación en Gestión Forestal Sostenible (iuFOR), Universidad de Valladolid, Av. De Madrid, 57, 34004 (Palencia)

² Grupo de Sistemas Inteligentes y Cooperativos (GSIC) ETSI de Telecomunicación, Universidad de Valladolid, Pº de Belén, 15, 47011 (Valladolid).

natalia.crespo@uva.es, <https://orcid.org/0000-0002-9566-2511>

quiveg@tel.uva.es, <https://orcid.org/0000-0002-6916-9213>

josemiguel.gimenez@uva.es, <https://orcid.org/0000-0001-7015-7896>

felipe.bravo@uva.es,

irene.ruano@uva.es, <https://orcid.org/0000-0002-6916-9213>

RESUMEN: Este estudio presenta un método para integrar datos del Inventario Forestal Nacional (IFN) con información de municipios españoles, utilizando tecnologías de la Web Semántica. El método propuesto convierte las geometrías oficiales de los municipios a formato de datos abiertos enlazados (LOD), asigna las parcelas del IFN a sus municipios correspondientes utilizando GeoSPARQL, estándar de la Web Semántica para el almacenamiento, consulta y procesamiento de datos espaciales, y publica la información en un repositorio LOD abierto. Los resultados se comparan con la realización de la asignación espacial llevada a cabo con un SIG y se analizan dos casos de estudio para demostrar el potencial del conjunto de datos integrado como LOD. El estudio concluye que el empleo de un SIG para realizar la operación espacial de asignar las parcelas a sus municipios resultó ser más eficiente que la utilización de GeoSPARQL en dos implementaciones diferentes (Virtuoso y Fuseki). Sin embargo, una vez asignadas las posiciones de las parcelas a la geometría del municipio en el que se encuentran, la integración con el resto de la base de datos del IFN mediante las tecnologías de la Web Semántica mejora significativamente la obtención de información a nivel local, ofreciendo un enfoque escalable y adaptable a varios contextos.

Palabras-clave: Inventario Forestal Nacional, GeoSPARQL, Entidades Locales, Datos Abiertos Enlazados.

1. INTRODUCCIÓN

La gestión forestal sostenible a nivel local es crucial para la conservación de los bosques y la promoción del desarrollo rural (Marey-Pérez y Rodríguez-Vicente, 2009; Martínez *et al.*, 2009; Gil *et al.*, 2011; Guadilla-Sáez *et al.*, 2019; Lorenzo-Sáez *et al.*, 2022). En este contexto, la integración de datos forestales con información municipal se presenta como una herramienta útil para la toma de decisiones informadas y la implementación de estrategias efectivas.

Los municipios, como unidades administrativas locales básicas, ofrecen un marco ideal para la gestión forestal debido a su cobertura geográfica completa del territorio, la posibilidad de agruparlos en unidades superiores, como las comarcas, y su nomenclatura estandarizada (códigos INE). Sin embargo, la falta de integración de los datos del Inventario Forestal Nacional (IFN) con información municipal oficial a menudo dificulta el análisis preciso y la toma de decisiones a esta escala.

La Web Semántica y las tecnologías geoespaciales ofrecen una solución prometedora para abordar este desafío. La Web Semántica permite la representación formal y la interconexión de datos, facilitando su análisis, publicación y reutilización (Berners-Lee *et al.*, 2001). Para la gestión y análisis de datos geoespaciales en la Web Semántica se utiliza GeoSPARQL (OGC, 2012). El proyecto europeo *Cross-Forest* ejemplifica el uso

de las tecnologías semánticas para la integración de datos forestales de España y Portugal (Fierro García *et al.*, 2022).

Por otro lado, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son herramientas ampliamente utilizadas en la gestión y análisis de datos espaciales. Mientras que GeoSPARQL proporciona la flexibilidad y el poder de la Web Semántica para almacenar, consultar e integrar datos geográficos, los SIG ofrecen herramientas de visualización y análisis espacial avanzadas para comprender y explotar estos datos.

En este estudio se propone un método para integrar datos del IFN con información municipal oficial comparando el uso de GeoSPARQL y SIG. Se espera que este trabajo proporcione datos precisos y herramientas a los responsables políticos, gestores forestales y demás actores relevantes para la toma de decisiones informadas, permitiendo una gestión forestal más eficiente y sostenible a nivel local.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Tecnologías Semánticas

En el marco de las tecnologías semánticas, este estudio propone integrar los datos del Inventario Forestal Nacional (IFN) con información municipal oficial, empleando datos abiertos enlazados (LOD) que utilizan estándares como RDF (*Resource Description Framework*), OWL (*Web Ontology Language*), RDFS (*RDF Schema*) y SPARQL (*Protocol and RDF Query Language*) para modelar, crear vocabularios específicos del dominio y consultar los datos (Berners-Lee *et al.*, 2001; Bizer *et al.*, 2009). Estos datos se almacenan en *triplestores*, repositorios especializados en gestionar y consultar datos RDF.

A diferencia de los formatos tradicionales, las tecnologías semánticas utilizan un modelo de datos basado en triples y grafos, permitiendo una representación más rica y expresiva de la información (Lausch *et al.*, 2015). Para análisis espaciales sobre datos geográficos RDF, se emplea GeoSPARQL, una extensión de SPARQL desarrollada por la OGC (*Open Geospatial Consortium*). Aunque varios *triplestores*, como Virtuoso o Fuseki, ofrecen soporte para GeoSPARQL, su nivel de soporte puede variar entre diferentes implementaciones (Jovanovik *et al.*, 2021; Li *et al.*, 2022), por lo que en este estudio vamos a comparar estos dos *triplestores* para realizar los análisis geoespaciales.

2.2. Fuentes de Datos

2.2.1. Inventario Forestal Nacional

Este estudio utiliza datos de la tercera edición del Inventario Forestal Nacional Español (IFNv3), el conjunto de datos publicado por el [MITECO](#) más reciente y completo disponible. La ubicación de las parcelas del IFNv3 se basa en una cuadrícula UTM de 1 km x 1 km y datos de cobertura forestal. Durante el trabajo de campo se identificaron utilizando un sistema de coordenadas ED50, que ya no es el estándar (BOE, 2007).

También existen desafíos con la información municipal en el IFNv3. Los datos están dispersos en dos tablas con inconsistencias y solo cubren una parte de las parcelas. Además, los propios datos del IFNv3 tienen limitaciones, como estar distribuidos en muchos archivos, tener un esquema complejo y utilizar un formato de archivo obsoleto y no compatible.

Sin embargo, el proyecto *Cross-Forest* (Portolés *et al.*, 2021) proporciona acceso abierto a los datos más recientes del IFN. Estos datos se publican en formato LOD, lo que permite consultas y análisis flexibles a través del [punto SPARQL de Cross-Forest](#), utilizando el *triplestore* Virtuoso de libre acceso (versión 07.20.3230). Cada parcela dentro del conjunto de datos *Cross-Forest* se identifica mediante un código único y está asociada a unas coordenadas tanto en el sistema de referencia original (ED50) como en WGS84.

2.2.2. Municipios Españoles

El [Instituto Geográfico Nacional](#) (IGN) actualiza y publica anualmente los límites territoriales oficiales de los municipios españoles en el centro de descargas de su base de datos geoespacial. Estos datos se encuentran en formato *Shapefile* (compatible con software SIG) y actualmente incluyen 8 131 polígonos y multipolígonos que representan las delimitaciones municipales.

Los datos se organizan en dos *Shapefiles* separados: uno para la Península e Islas Baleares (referenciado en ETRS89) y otro para las Islas Canarias (referenciado en REGCAN95, cercano a WGS84). Para este estudio, nos centramos específicamente en unificar los dos *Shapefiles* en un único archivo con sistema de referencia de coordenadas WGS84 y extrajimos el código municipal asociado a cada polígono.

2.3. Geoprocesamiento de los datos

Para mayor claridad y organización, hemos diseñado el flujo de trabajo estructurado que se muestra en la Figura 1. Este esquema representa la metodología que utilizamos para integrar, validar y publicar la información combinada de parcelas y municipios del IFNV3. Empleamos dos enfoques: uno basado en semántica y otro basado en SIG, permitiendo evaluar las ventajas de cada método y realizar una validación cruzada.

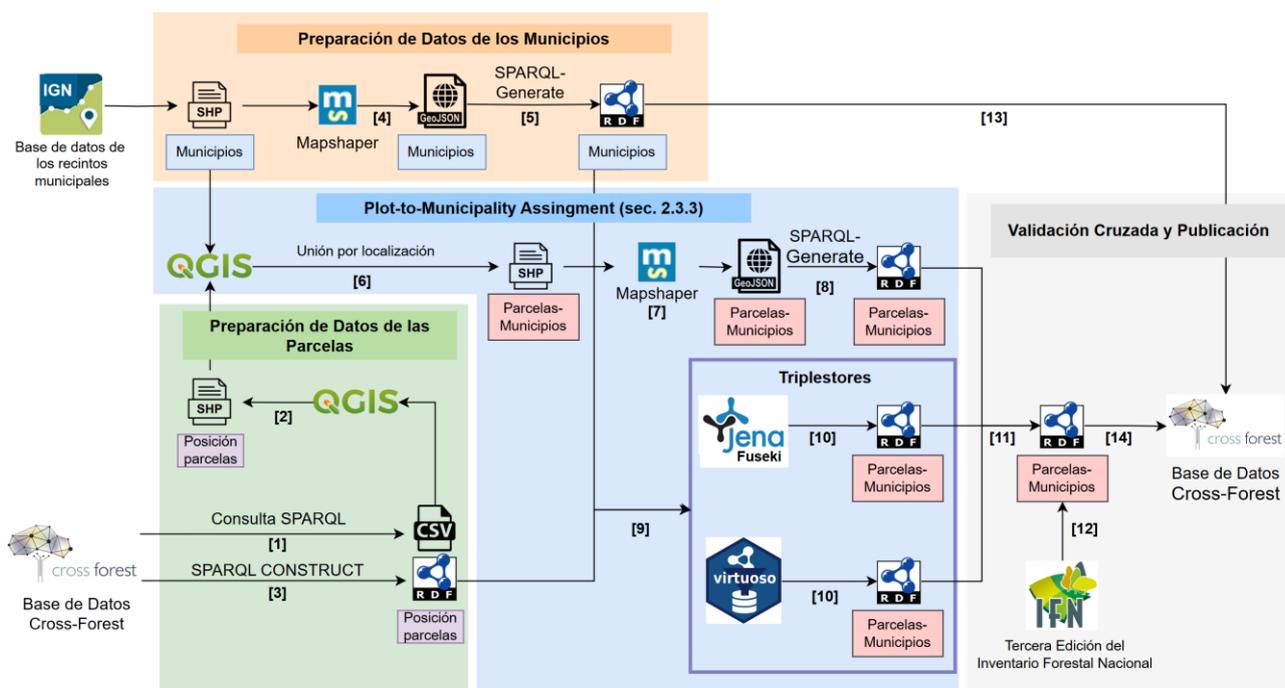


Figura 50. Diagrama de flujo que resume la metodología llevada a cabo para la asignación de parcelas del IFNV3 al municipio en el que se localizan.

2.3.1. Preprocesado de los datos

Para la integración de la información (IFNV3 y límites municipales) se homogeneizaron los formatos de ambas bases de datos.

Por un lado, de la base de datos semántica *Cross-Forest* se descargaron las posiciones de las parcelas en WGS84 realizando una consulta al punto SPARQL para extraer esta información:

- Para la asignación con SIG: se descargaron las posiciones en formato CSV (Figura 1 [1]) y luego se transformaron a un *Shapefile* con geometría de puntos utilizando QGIS 3.28.6 (Figura 1 [2]).
- Para la asignación con GeoSPARQL: se descargaron las posiciones directamente en formato RDF (la base de los datos abiertos enlazados) (Figura 1 [3]).

Por otro lado, en cuanto a la información de los municipios obtenidos del IGN en formato *Shapefile*:

- Para la asignación con SIG: los datos se utilizaron directamente sin necesidad de transformaciones.
- Para la asignación con GeoSPARQL: se transformó el *Shapefile* de los municipios a RDF. Primero, se utilizó *Mapshaper* (Bloch, 2023) para transformar el *Shapefile* en GeoJSON (Figura 1 [4]). Luego, una consulta SPARQL-Generate (Lefrançois *et al.*, 2017) transformó los datos GeoJSON a RDF, incluyendo la geometría y atributos municipales (códigos, nombres, etc.) (Figura 1 [5]).

2.3.2. Asignación de las Parcelas a sus Municipios

- Para la asignación con un SIG: se utilizaron dos *Shapefiles*, uno con la ubicación de las parcelas descargadas de *Cross-Forest* y otro con la geometría y atributos de todos los municipios españoles. Dentro del software QGIS, la herramienta "Unir atributos por localización" (Figura 1 [6]) permitió asignar la posición de cada

parcela al recinto municipal que la contine. El resultado de la integración se transformó a RDF (Figura 1 [7, 8]) para integrarlo con los datos del inventario en el *dataset Cross-Forest*.

- Para la asignación con GeoSPARQL: se configuraron dos entornos de prueba con *triplestores* compatibles con GeoSPARQL: Virtuoso y Fuseki (Figura 1 [9]). Estos entornos contenían las posiciones de las parcelas del IFNv3 y los datos municipales en formato RDF. Se utilizó una consulta GeoSPARQL personalizada para cada *triplestore* para asignar parcelas a municipios (Figura 1 [10]). La consulta verifica si la geometría de la parcela está completamente dentro del polígono del municipio. Esta asignación generó triples RDF que asocian el identificador único de cada parcela con el código de su municipio correspondiente.

2.4. Validación Cruzada y Publicación

Las asociaciones parcela-municipio validadas (Figura 1 [11, 12]) junto con la información de municipios en RDF (Figura 1 [13]) se integraron en *Cross-Forest* (Figura 1 [14]). Este conjunto de datos, accesible a través de un punto final SPARQL, permite análisis, consultas y descarga de datos en varios formatos (RDF, CSV, JSON, GeoJSON...). Además, para garantizar la transparencia y reproducibilidad, todos los archivos utilizados y generados durante este proyecto, junto con los *scripts* desarrollados, están disponibles públicamente en un [repositorio de GitHub](#).

3. RESULTADOS

3.1. Asignación Parcela-Municipio

En la Tabla 1 se muestran los resultados obtenidos por cada uno de los procedimientos empleados para la asignación. QGIS y Fuseki obtuvieron resultados idénticos. En cambio, Virtuoso asignó al menos un municipio a todas las parcelas, pero el 73% de las mismas se asignaron a varios municipios, generando falsos positivos. Solo el 27% se asignó a un único municipio correcto.

Tabla 1. Comparación de la eficacia de diferentes procedimientos (Virtuoso, Fuseki y QGIS) para asignar las parcelas del IFNv3 a los municipios donde se localizan.

	<i>Virtuoso</i>	<i>Fuseki</i>	<i>QGIS</i>
Parcelas asignadas	99 045 (100,00%)	99 026 (99,98%)	99 026 (99,98%)
Asignadas correctamente	26 581 (26,83%)	99 025 (99,98%)	99 025 (99,98%)
Asignadas incorrectamente	72 454 (73,15%)	0	0
Parcelas no asignadas	0	19 (0,02%)	19 (0,02%)

Además, se identificaron 19 parcelas asignadas por Virtuoso que no lo fueron por los otros métodos. Estas se ubican fuera de España (en el mar, en Francia o en Portugal).

La comparación con información previa del IFNv3 arrojó que había un 56% de errores en las asignaciones previas al trabajo de campo. Durante el trabajo de campo, donde solo se asoció el código municipal al 47% de las parcelas, se encontraron errores en el 12% de las asignaciones.

3.2. Casos de Estudio

La asignación exitosa de parcelas a municipios permitió crear un mapa que muestra las especies dominantes dentro de cada municipio español. Este mapa abarca todas las zonas forestales del país e indica las especies principales en las distintas regiones.

La Figura 2 muestra un caso de estudio detallado: las especies dominantes en los 10 municipios del Parque Nacional Picos de Europa con parcelas del IFNv3. El castaño (*Castanea sativa* Mill.) es la especie más dominante, seguido por la haya europea (*Fagus sylvatica* L.) y las plantaciones de pino radiata (*Pinus radiata* D. Don).

Agrupando los municipios también se pueden analizar la diversidad forestal en comarcas españolas con ecosistemas forestales representativos. En la Figura 3 se muestra el predominio de parcelas puras (con una especie dominante), mixtas de baja diversidad (2 o 3 especies dominantes) o alta diversidad (mezcla de más de 3 especies) en 17 comarcas repartidas por todo el territorio español.

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Este estudio presenta un enfoque innovador para analizar la información del Inventario Forestal Nacional Español (IFNv3) a nivel local, aprovechando los Datos Abiertos enlazados (LOD) y las tecnologías semánticas. Esto permite a investigadores y partes interesadas acceder rápidamente a datos específicos, como información sobre la diversidad forestal (Guadilla-Sáez *et al.*, 2019), utilizando consultas simples.

Los resultados obtenidos indican que los métodos basados en GIS y GeoSPARQL (Fuseki y QGIS) son precisos para asignar municipios a parcelas dentro de España. Sin embargo, Fuseki tardó casi dos horas en realizar la asignación, mientras que QGIS un par de minutos. Virtuoso presentó problemas produciendo falsos positivos. Jovanovik *et al.*, también observaron más errores con Virtuoso que con Fuseki. Además, confirmamos que la información de los municipios que se encuentra en el IFNv3 no es precisa.

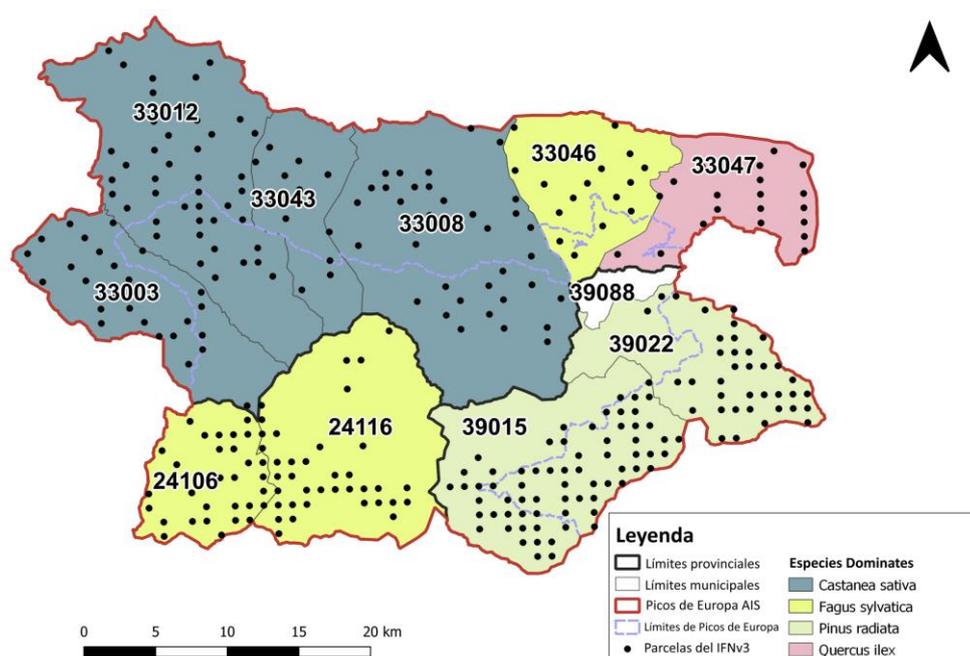


Figura 2. Especies dominantes de los municipios que forman parte del área de influencia socioeconómica (AIS) del parque nacional de Picos de Europa.

Las tecnologías de la Web Semántica demostraron ser altamente beneficiosas en cuanto que proporcionaron una solución eficaz para superar las barreras de interoperabilidad, permitiendo la conexión efectiva de grandes conjuntos de datos heterogéneos y su publicación abierta. Esto facilita la reutilización, el intercambio y el análisis de información forestal a diferentes escalas. Sin embargo, las tecnologías SIG demostraron ser mejores en la realización de operaciones espaciales, aunque tienen limitaciones a la hora de integrar grandes bases de datos de forma eficaz y su publicación en abierto.

El procedimiento diseñado e implementado en este estudio facilitan el uso sinérgico de conjuntos de datos geoespaciales, lo que los hace adaptables a diversos casos de uso. Además, demuestra la eficacia del empleo conjunto de tecnologías SIG para la realización de la asignación espacial y las tecnologías semánticas para la integración y publicación de bases de datos.

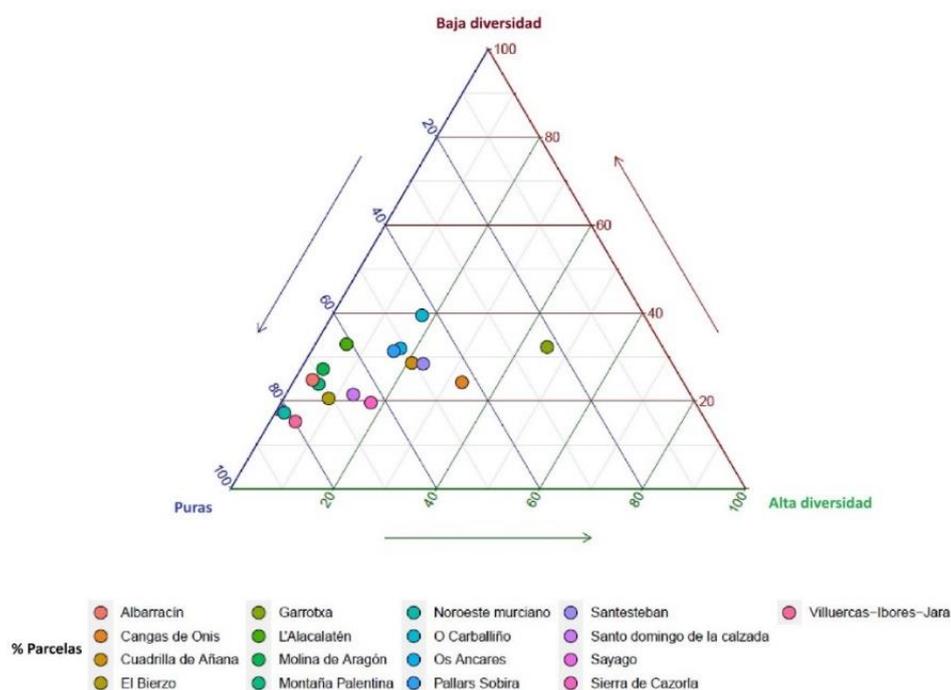


Figura 3. Diagrama ternario (paquete ggtern (Hamilton y Ferry, 2013)) que representa el porcentaje de mezcla de especies en las parcelas del IFNv3 de 17 comarcas españolas.

AGRADECIMIENTOS

Nos gustaría agradecer al Instituto Geográfico Nacional Español, al Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) y al grupo TRAGSATEC por proporcionar los recursos y el apoyo necesarios para llevar a cabo esta investigación. Por último, un agradecimiento especial a los técnicos forestales que recopilaban los datos de campo para los inventarios forestales; sin su invaluable esfuerzo, este trabajo no habría sido posible.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Berners-Lee, T., Hendler, J., y Lassila, O. (2001). The semantic web. *Scientific American*, 284(5), 34–43.
- Bizer, C., Heath, T., Berners-Lee, T. (2009). Linked Data: The Story so Far. *International Journal on Semantic Web and Information Systems (IJSWIS)*, 5, 1-22. <https://doi.org/10.4018/978-1-60960-593-3.ch008>
- Bloch, M. (2023). Mapshaper v. 0.6.41. Retrieved from <https://github.com/mbloch/mapshaper> Available at: <https://github.com/mbloch/mapshaper>, Fecha de acceso: agosto 2023.
- BOE. (2007, 7 27). Real decreto 1071/2007, de 27 de julio, por el que se regula el sistema geodésico de referencia oficial en España. Available at: <https://www.boe.es/eli/es/rd/2007/07/27/1071>, Fecha de acceso: junio 2023
- Fierro García, B., Roldán Zamarrón, A., Lerner Cuzzi, M., Baiget Llompart, R., Aguirre Briones, F., Gonzalvo Morales, V., Bravo Oviedo, F. (2022). Cross-forest, un proyecto de datos forestales abiertos de España y Portugal. In *Actas de la 8ª congreso forestal español* (p. 13). Lérida, España.
- Gil, M. V., Blanco, D., Carballo, M. T., y Calvo, L. F. (2011). Carbon stock estimates for forests in the Castilla y León region, Spain. A GIS based method for evaluating spatial distribution of residual biomass for bioenergy. *Biomass and Bioenergy*, 35(1), 243-252. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.08.004>

- Guadilla-Sáez, S., Pardo-de Santayana, M., Victoria, R.-G., y Svenning, J.-C. (2019). Biodiversity conservation effectiveness provided by a protection status in temperate forest commons of north Spain. *Forest Ecology and Management*, 433, 656-666. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.11.040>
- Hamilton, N. E., y Ferry, M. (2018). ggtern: Ternary diagrams using ggplot2. *Journal of Statistical Software, Code Snippets*, 87 (3), 1–17. doi: 10.18637/jss.v087.c03
- Jovanovik, M., Homburg, T., y Spasić, M. (2021). A geosparql compliance benchmark. *ISPRS International Journal of GeoInformation*, 10(7). doi: 10.3390/ijgi10070487
- Lausch, A., Schmidt, A., & Tischendorf, L. (2015). Data mining and linked open data – new perspectives for data analysis in environmental research. *Ecological Modelling*, 295, 5-17. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2014.09.018>
- Lefrançois, M., Zimmermann, A., & Bakerally, N. (2017). A SPARQL extension for generating RDF from heterogeneous formats. In Proc. extended semantic web conference (eswc'17) (p. 35–50). Portoroz, Slovenia. Retrieved from <http://www.maxime-lefrancois.info/docs/>
- Lorenzo-Sáez, E., Oliver-Villanueva, J.-V., Lemus-Zúñiga, L.-G., Urchueguía, J. F., y Lerma-Arce, V. (2022). Development of sectorial and territorial information system to monitor ghg emissions as local and regional climate governance tool: Case study in Valencia (Spain). *Urban Climate*, 42, 101125. doi: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101125>
- Marey-Pérez, M., y Rodríguez-Vicente, V. (2009). Forest transition in northern Spain: Local responses on large-scale programmes of field-afforestation. *Land Use Policy*, 26(1), 139-156. doi: <https://doi.org/10.1016/j.lyusepol.2008.02.004>
- Martínez, J., Vega-García, C., y Chuvieco, E. (2009). Human-caused wildfire risk rating for prevention planning in Spain. *Journal of Environmental Management*, 90(2), 1241-1252. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.07.005>
- OGC. (2012). Ogc geosparql: A geographic query language for rdf data, version 1.0. Available at: <http://www.opengis.net/doc/IS/geosparql/1.0>, Fecha de acceso: junio 2023.
- Portolés, D., Vega-Gorgojo, G., Giménez-García, J. M., Fierro, B., y Jurado, T. (2021). Data exportation and publication- final report [Computer software manual]. Project Cross-Forest. Deliverable 2.

Atalaiant des de l'espai: divulgando la realidad geoespacial de las Islas Baleares mediante un corpus de datos satelitales publicado en la prensa regional

*J. Bauzà Llinàs*¹

¹ *Servei de Sistemes d'Informació Geogràfica i Teledetecció, Universitat de les Illes Balears. Cra. de Valldemossa, km 7,5. 07122 Palma (Illes Balears)*

joan.bauza@uib.cat, <https://orcid.org/0000-0001-8538-5197>

RESUMEN: Se analiza un corpus de más de 90 artículos de prensa escritos en catalán por el autor entre 2016 y 2020, centrados en el uso de técnicas de análisis de imágenes satelitales para estudiar fenómenos geográficos en el archipiélago balear. Los artículos, dirigidos a un público general, se estructuran en torno a una imagen central y un doble comentario: una breve explicación técnica del proceso aplicado a la imagen, seguida de un análisis más amplio del problema territorial tratado.

El estudio examina la distribución temática y espacial de los contenidos, abarcando tanto aspectos ambientales como sociales de la geografía, y resaltando la perspectiva regional implícita. Se exploran fenómenos diversos como las heladas de irradiación y la formación de brisas marinas, además de los orígenes y técnicas de análisis de las imágenes (sensores multiespectrales, SAR, LiDAR).

El trabajo destaca la relevancia de las imágenes satelitales en el análisis territorial y subraya la necesidad de estrategias de comunicación efectivas para promover la comprensión del territorio y los procesos ambientales. Este enfoque integrado puede servir como modelo para fomentar el conocimiento geoespacial y la conciencia ambiental en otras regiones y con un innegable potencial didáctico y educativo.

Palabras-clave: Teledetección, Divulgación Científica, Análisis Geográfico Regional, Didáctica de la Geografía.

1. INTRODUCCIÓN

Esta comunicación nace del convencimiento de que la Teledetección es una herramienta magnífica para plantear preguntas de ámbito geográfico. Sin embargo, al enfrentar el reto de explicar a un público general qué hace un geógrafo, y aún más si se especializa en Teledetección, a menudo nos encontramos ante una encrucijada conceptual. El maestro Yi-Fu Tuan (1991) acude al rescate al definir de manera acertada la Geografía como el estudio de la Tierra como hogar de las personas. Partiendo de esta definición integral, esta comunicación se centra principalmente en la isla de Mallorca, aunque se mantiene un compromiso con la exploración de múltiples regiones del planeta, reflejando la idea de que el geógrafo actual debe ser capaz de interpretar hechos geográficos en diferentes escalas (Olcina Cantos & Baños Castiñeira, 2004).

En ocasiones, el punto de partida de los artículos es el espacio geográfico en el sentido abstracto de unas simples coordenadas, para luego avanzar hacia el territorio como espacio medido y regulado para, finalmente, saltar hacia el paisaje en el sentido del territorio interpretado. Es en este nivel superior donde se aspira a que cada lector incorpore su realidad particular al territorio.

En definitiva, la Teledetección se plantea como una ventana al mundo sobre la cual podemos proyectar nuestra mirada, curiosa, con la esperanza de ver el elefante dentro de la serpiente. Para ello se incide en la importancia de contrastar la magnífica ventana que nos ofrece la Teledetección con el trabajo de campo. En una entrevista al Sr. Jaume Miranda, director del ICGC, él se presentó en el plató con la última edición de los mapas topográficos de Catalunya. El periodista Antoni Bassas bromeó sobre la utilidad de los mapas de papel en la era de Google Earth, a lo cual el Sr. Miranda respondió: "hemos digitalizado la Tierra, pero ésta no ha dejado de ser analógica" (Bassas, 2016).

2. METODOLOGÍA

Los artículos han sido publicados en la edición en papel del fin de semana del periódico Ara Balears, editado en lengua catalana. El formato de los artículos consiste en una página completa del periódico y, ocasionalmente, en dos páginas. La ubicación de la página en el periódico ha evolucionado desde su inicio en la sección de sociedad hasta las páginas de ciencia, donde comparte espacio con un artículo de ciencia a escala nacional y otro a escala internacional. Para facilitar el trabajo entre el autor y la redacción del periódico, se ha establecido una plantilla que incluye un título, un subtítulo y un texto de aproximadamente 3900 caracteres con espacios, con algunos destacados dentro del texto. La figura, con unas dimensiones de 180 mm x 235 mm, desempeña un papel claramente protagonista (ver figura 4 en anexo).

La elección de la temática de cada artículo corresponde al autor, sin ninguna sugerencia por parte de la redacción del periódico. En la selección de los temas, se puede tener en cuenta la actualidad, como en el caso de un incendio forestal reciente o una inundación, pero este no es necesariamente el criterio principal. Las ideas surgen a través de un proceso creativo de la observación del entorno, de una conversación, de la lectura de un libro, etc. que, en conjunto, lo hace exigente en cuanto a tiempo. Como se mostrará en los resultados, el ámbito geográfico más utilizado es la isla de Mallorca. Un elemento clave que ha ido evolucionando consiste en evitar al máximo la terminología técnica, sustituyéndola por metáforas y lenguaje figurativo, tarea en la que ha sido de gran utilidad el diccionario terminológico de teledetección (Pons Fernández & Arcalís Planas, 2012).

Los artículos, dirigidos a un público general, se organizan en torno a una imagen principal que sirve como punto de partida visual y conceptual. A partir de esta imagen, se desarrollan dos comentarios complementarios: en primer lugar, una explicación que detalla el proceso utilizado para crear o seleccionar la imagen, destacando los métodos, técnicas o herramientas aplicadas. En segundo lugar, se presenta un análisis más amplio y profundo que aborda el problema territorial en cuestión, explorando sus implicaciones y causas, así como el contexto socioeconómico y ambiental en el que se inscribe. Esta doble aproximación permite al lector comprender tanto los aspectos visuales y técnicos como el trasfondo y la relevancia del tema tratado. Ocasionalmente, se invita al lector a una reflexión sobre el impacto de estos problemas en la vida cotidiana y en la construcción de nuestro entorno futuro.

Para procesar las diferentes fuentes de teledetección, como imágenes de satélite, ficheros LiDAR y ortofotos, se han alternado diferentes programas de SIG, como Arcmap (Esri, 2024), MiraMon (Pons, 2004), y QGIS (QGIS Development Team, 2024), así como librerías de Python (Python Software Foundation, 2024) o servidores como Google Earth Engine (Gorelick et al., 2017).

3. RESULTADOS

3.1. Área geográfica representada en los artículos

A partir de los datos de la gráfica, se destaca que la mayoría de los artículos están centrados en la isla de Mallorca, seguida por las Illes Balears como archipiélago. Otras áreas de interés frecuente son el Mar Mediterráneo y los artículos de ámbito global, mientras que otras islas del archipiélago Balear, como Menorca y Cabrera, así como Europa presentan una menor representación. Por último, se incluyen áreas clasificadas como "Otras", que corresponden a ubicaciones con un único artículo dedicado, como: Almería, los Alpes Suizos, Cuba, Eivissa, el Estrecho de Gibraltar, Estrómboli, Formentera, Groenlandia, Indonesia, las Islas Canarias, el Lago Baikal, el Océano Atlántico, el Río Congo, Sicilia, Túnez y el Río Ebro.

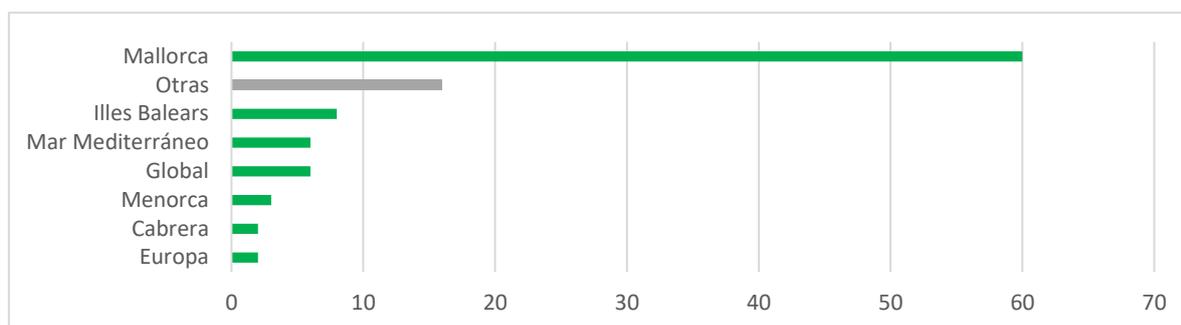


Figura 1. Relación y frecuencia de las áreas geográficas representadas en el corpus de artículos.

3.2. Temática de los artículos

La gráfica muestra que los artículos abordan una amplia gama de temáticas, destacando especialmente el tema forestal, que es el más frecuente, seguido de cerca por los relacionados con inundaciones, temperatura de la superficie terrestre (LST) y topografía. También tienen una presencia significativa los artículos sobre incendios forestales, viento, nivel del mar y cultivos. Temáticas como temperatura de la superficie del mar (SST), visión estratégica del territorio, innivación, luz nocturna, vegetación, cuencas hidrográficas, sequía, vulcanología, calidad del aire, cubiertas del suelo, la exploración en la pluma de Joseph Conrad y humedales aparecen con menor frecuencia.

Finalmente, en la categoría otros se incluyen temas diversos, cada uno abordado en un único artículo: Albedo, Conectividad insular, Demografía, Economía, Evapotranspiración, Geodesia, Glaciares, Humedad del suelo, Isla de calor urbana, Irradiancia solar, Karst, Lluvia, Niebla, Ondas internas, Paisaje, Planeamiento urbanístico, Pluma de sedimento, Polvo en suspensión, Posidonia, Solsticios y Equinoccios, Teledetección y nubosidad, Overview effect.

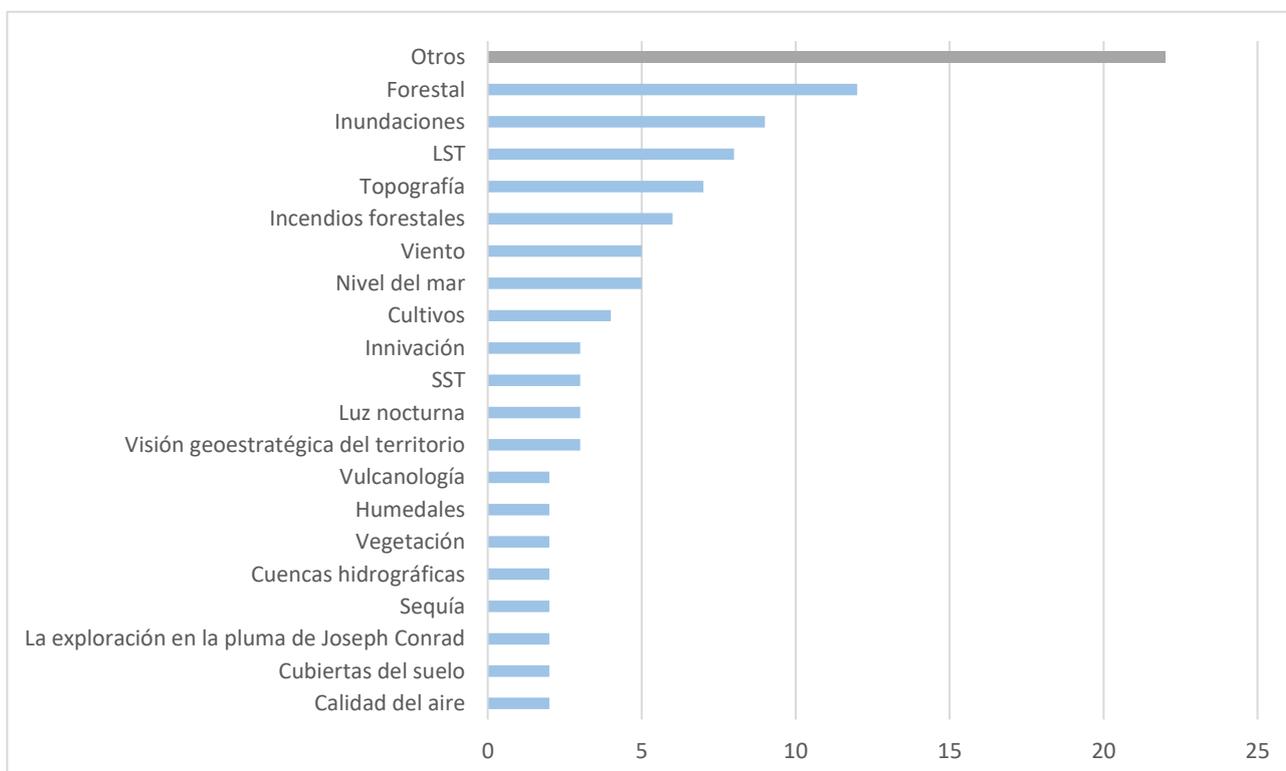


Figura 2. Relación y frecuencia de las temáticas utilizadas en el corpus de artículos.

3.3. Plataformas y técnicas utilizadas

Las plataformas más utilizadas en los artículos son las aeronaves equipadas con sensor LiDAR, que destacan como la herramienta principal de análisis para generar los modelos digitales del terreno. Le siguen, en orden de frecuencia, los satélites *Sentinel-2* y *Landsat-8*. Otras plataformas empleadas con frecuencia

incluyen los satélites *Terra* y *Aqua*, además del satélite *Suomi National Polar-orbiting Partnership* (SNPP). En la categoría "otras", con un único artículo se incluyen: *Meteosat*, *Orbview-3*, *GPM*, *Apollo-8*, *Gambit-1*, *GNSS*, *ISS* y *Landsat-2*.

Las técnicas más utilizadas en los artículos incluyen los modelos digitales del terreno y derivados, la representación de imágenes en color natural, las imágenes en color falso, el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), la temperatura de la superficie terrestre (LST), la representación de la banda C del radar de apertura sintética y la luz nocturna. Otras técnicas aplicadas, aunque con menor frecuencia, son los índices de presencia de agua (NDWI), las series temporales, y los modelos digitales de superficies.

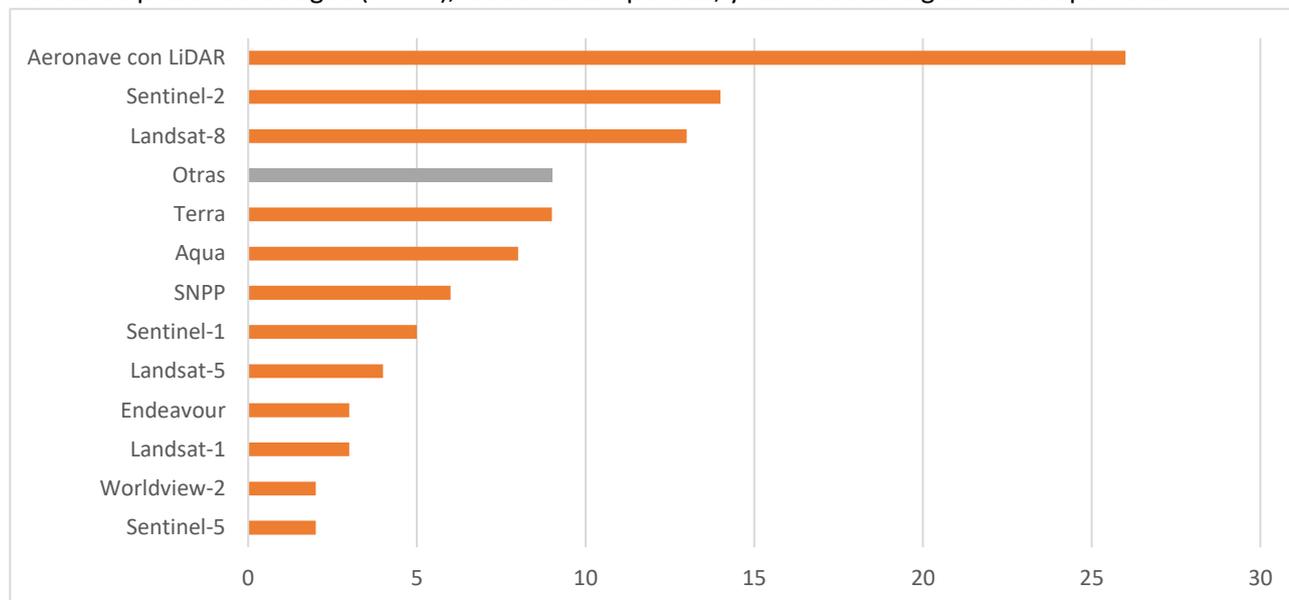


Figura 3. Relación y frecuencia de las plataformas utilizadas en el corpus de artículos.

4. CONCLUSIONES

El corpus de artículos publicados en el periódico *Ara Balears* muestra que la mayoría de las publicaciones se centran en Mallorca y el entorno balear, lo que refleja un interés regional predominante. Los temas más tratados incluyen fenómenos ambientales, como incendios forestales e inundaciones, con un uso frecuente de técnicas basadas en archivos LiDAR y en satélites con sensores multispectrales, como Sentinel-2 y el programa Landsat, para su análisis. La apuesta por evitar el lenguaje técnico, apoyándose en imágenes, ha facilitado la comprensión de los problemas geográficos y ambientales entre el público general, una estrategia que también ha resultado eficaz para el autor en el ejercicio de la actividad docente.

El mayor reconocimiento y aceptación de los artículos se ha logrado a través del efecto sorpresa, como al descubrir que son los Pirineos, y no la Serra de Tramuntana, los que protegen a Mallorca del viento homónimo (Bauzà, 2019). Sin embargo, ha sido principalmente a través del relato que se ha conseguido este éxito. Cuando el relato ha sido el verdadero protagonista, se ha generado una magia especial: como en la visita de Charlton Heston, en su papel de George Taylor en *El Planeta de los Simios*, a unas islas imaginarias que habían sido transformadas por la subida del nivel del mar, donde, al descubrir la verdad que lo sitúa en las islas Balears, termina maldiciendo a la humanidad (Bauzà, 2018a) o en la voz de Toni Matheu, quien describe la toponimia de la finca de Cúber en la Sierra de Tramuntana, tal como la recordaba en su infancia, a partir de una fotografía del vuelo americano de 1956, cuando la finca aún no se había convertido en un pantano (Bauzà, 2018b).

La prensa como soporte material, el relato, la anécdota o la curiosidad como medios de transmisión, y la imagen como centro de atención constituyen instrumentos para lograr que la teledetección (una técnica poco conocida por el gran público) sea vista como una herramienta que ayuda a comprender, desde una perspectiva externa, los entresijos internos de la compleja superficie de la Tierra y las biocenosis en las que nos desenvolvemos.

AGRADECIMIENTOS

Quisiera expresar mi agradecimiento al Dr. Miquel Grimalt Gelabert y al Dr. Xavier Pons Fernández por su valiosa aportación de ideas y sugerencias a muchos de los artículos publicados, que han enriquecido significativamente el contenido de este trabajo.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Bassas, A. (2016, març 5). Entrevista a Jaume Miranda. Ara.cat. https://www.ara.cat/videos/podcasts/entrevista-dantoni-bassas-jaume-miranda_8_1376928.html
- Bauzà, J. (2018, febrer 10). Viatge a unes illes imaginàries. Ara Balears. https://www.arabalears.cat/societat/viatge-illes-imaginaries_1_2765794.html
- Bauzà, J. (2018b, novembre 16). Paisatges perduts. Ara Balears. https://www.arabalears.cat/societat/paisatges-perduts_1_2713094.html
- Bauzà, J. (2019, gener 12). Albirant la Tramuntana. Ara Balears. https://drive.google.com/file/d/1Zv1D175pQw_krOH7RynQDSCKK9FBz4A6/view
- Esri. (2024). ArcGIS Desktop (10.8) [ArcMap]. <https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-desktop/overview>
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18-27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- Olcina Cantos, J., & Baños Castiñeira, C. J. (2004). Los fines de la geografía. *Investigaciones Geográficas*, 33, 39. <https://doi.org/10.14198/INGEO2004.33.05>
- Pons Fernández, X., & Arcalís Planas, A. (with Institut Cartogràfic de Catalunya & Termcat, Centre de Terminologia). (2012). *Diccionari terminològic de Teledetecció* (Primera edició). ICC, Institut Cartogràfic de Catalunya.
- Pons, X. (2004). *MiraMon. Sistema d'Informació Geogràfica i software de Teledetecció* [Software]. Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals, CREA.
- Python Software Foundation. Python Language Reference, version 2.7. Available at <http://www.python.org>
- QGIS Development Team (2024). QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. <http://qgis.osgeo.org>
- Tuan, Y.-F. (1991). A View of Geography. *Geographical Review*, 81(1), 99. <https://doi.org/10.2307/215179>

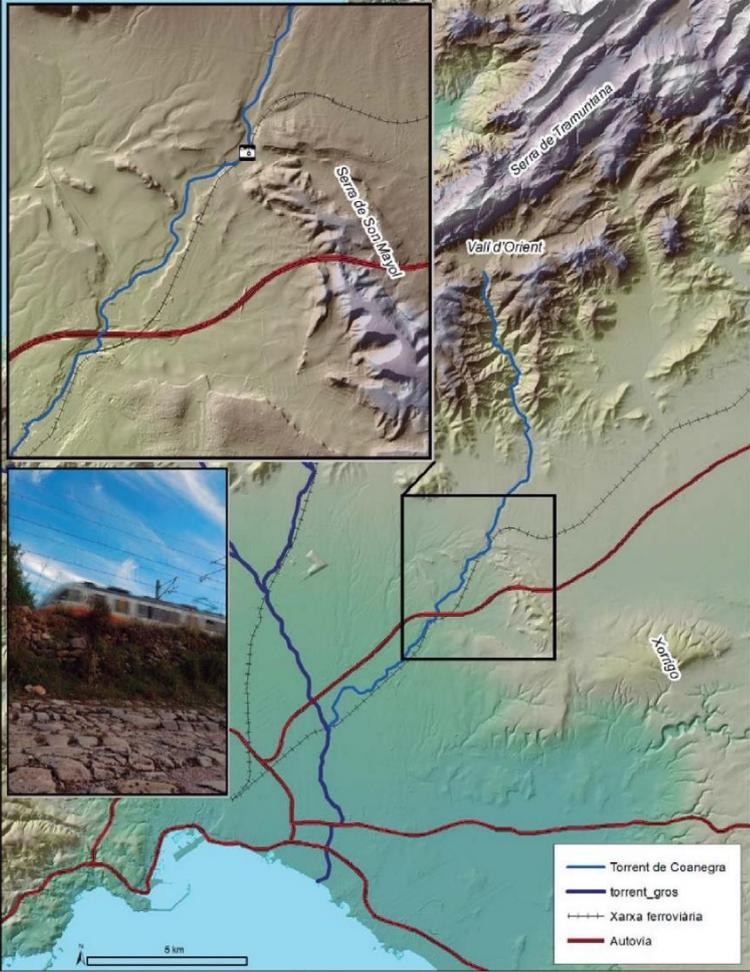
6. ANEXO

El índice completo de todos los artículos, así como el acceso a cada uno de ellos en formato PDF, están disponibles en la dirección: <https://drive.google.com/drive/folders/1xHePjBD0iKGWdV3Cr6ze-3iNpTtlZd2?usp=sharing>

36
ciència

DISSABTE, 31 D'OCTUBRE DEL 2020 arabalears

J. BAUZÀ, ION



ATALAIANT DES DE L'ESPAI

De terratrèmols, romans, ferrocarril i un torrent

Cercarem a Marratxí, cruïlla de paisatges, la clau de la sortida natural del Pla de Ciutat cap al Raiguer

Joan Bauzà
Geògraf

Aquest article neix d'una sortida de camp pel terme de Marratxí amb el geògraf Miquel Grimalt. A la passejada també s'hi afegí un grup de professors de l'Institut de Marratxí amb l'objectiu d'anar perfilant una lectura conjunta del paisatge. En definitiva, una ruta d'horabaixa de tardor trescant per la contrada, expectants per compartir algunes de les claus que aquesta ens podria oferir, guiats pel professor Grimalt.

Una d'aquestes claus, consistent a esbrinar quina és la sortida natural de la plana de Ciutat cap al Raiguer, la cercarem al camí de la Bomba, a l'altura de les cases de Son Sureda, concretament en el tram localitzat en el mapa de detall amb el símbol d'una càmera i que també veim representat a la fotografia amb el ferrocarril caçat al vol. Aquest camí, de traça magnífica i possible origen romà – malgrat la manca de consens entre els experts – transcorre en aquest tram paral·lel al torrent de Coanegra. Arribats al segle XIX, els enginyers, cercant la ruta més planera, triarien la mateixa opció per traçar la via del ferrocarril.

El mapa presenta una visió de conjunt en què destaquen els elements del relleu gràcies a la incorporació de les seves ombres. Una tècnica habitual per visualitzar aquests elements de manera intuïtiva, com es pot observar a la serra de Tramuntana o a Xorriç, amb la xarxa de torrents i els seus meandres ben definits.

Botam del mapa principal al de detall, dins l'àrea del quadrat, per situar-nos a la serra de Son Mayol, escenari de la sortida de camp per on transcorre un tram del camí de la Bomba i de la línia de ferrocarril. Començarem per observar com la muntanya sembla parcialment buidada, com si una pala gegantina se n'hagués emportat el contingut. Això no és més que la feina ingent del torrent de Coanegra, amb el seu canal principal representat en el mapa.

Dos gegants

En definitiva, ens trobam davant dos gegants: per una banda, la força interna de la Terra, que, amb la seva activitat tectònica, genera el relleu i, per l'altra, un torrent poderós que se'l va menjant.

Així, en aquest torcebraç entre la serra de Son Mayol a mesura que aquesta s'anava elevat – amb alguns ensurts en forma de terratrèmol com el del 1851 – i la capacitat erosiva del torrent de Coanegra, ha resultat clara guanyadora aquesta darrera. Per tant, convé reconèixer la força del torrent per obrir-se pas entre la muntanya, fertilitzar el pla de Ciutat i acabar per compartir protagonisme en el tram final amb el torrent Gros, que també veim representat en el mapa.

Arribat el segle XX ens estalviarem revolts adreçant la ruta amb l'autovia. El preu seria un fort pendent, necessari per superar la serra de Son Mayol. Cavalls de força i benzina. A Sóller no hi hagué alternativa a foradar la muntanya per al ferrocarril el segle XIX o per als vehicles un segle més tard.

Així, acabàvem la volta per Marratxí, autèntica cruïlla de paisatges, observant la feina d'un torrent nascut a la vall d'Orient, amb la bellesa del salt del Freu, però que continua manifestant el seu misteri aigües més avall, com hem vist al camí de la Bomba, on ens sorpren amb trossos en forma de petites gemmes, que sols necessiten una mirada diferent.

Per acabar, un apunt cartogràfic: fixeu-vos, al mapa, en la llargària moderada de les ombres i l'orientació cap a Xaloc. Necessàriament, el sol hauria de llançar els rajos des de Mestral i prou elevat sobre l'horitzó – una combinació astronòmica impossible a la nostra latitud. La resposta es troba en segles de dibuixar mapes a llum d'una espelma situada sobre el cantó frontal esquerre de la taula del cartògraf, mentre aquest, amb la mà dreta, anava traçant el territori sobre el paper, il·luminant els vessants de Mestral, d'on provenia la llum de l'espelma i ombrant els de Xaloc. Un efecte visual que hem incorporat com a natural i que provoca que, l'ull no entrenat, en observar una imatge de satèl·lit amb les ombres orientades en la direcció natural correcta, barati valls amb muntanyes. —

Model digital d'ombres a partir de LIDAR amb cel·la 5 m.

— Torrent de Coanegra
— torrent_gros
— Xaixxa ferroviària
— Autovia

Figura 4. Ejemplo de uno de los artículos publicados, mostrando el modelo de plantilla seguido habitualmente, que incluye el título, subtítulo, texto principal de aproximadamente 3900 caracteres con espacios, destacados dentro del texto y una figura con dimensiones de 180 mm x 235 mm

Representaciones paisajísticas del Camino de Santiago y su clasificación mediante inteligencia artificial: nuevos horizontes en los estudios de la movilidad turística y el paisaje

R. Pérez-Campaña¹, B. Moya-Gómez¹, S. Barrasa-García¹

¹Departamento de Geografía, Facultad de Geografía e Historia, Universidad Complutense de Madrid. C. del Profesor Aranguren, s/n, 28040 (Madrid).

r.perez.campana@ucm.es, <https://orcid.org/0000-0002-1069-4590>

bmoyagomez@ucm.es, <https://orcid.org/0000-0002-0520-039X>

sbarrasa@ucm.es, <https://orcid.org/0000-0002-7097-7963>

RESUMEN: La clasificación automática de fotografías mediante inteligencia artificial está abriendo interesantes vías de investigación en numerosos campos disciplinares. En este trabajo realizamos un ejercicio exploratorio para el reconocimiento de fotografías georreferenciadas compartidas en redes sociales por usuarios que realizan (íntegra o parcialmente) el Camino de Santiago. El objetivo principal es doble; por una parte, realizar un breve acercamiento a la utilidad que puede tener la clasificación automática para el análisis de la movilidad turística y, por otra, conseguir una clasificación preliminar de las fotografías diferenciando entre fotografías de paisaje y otras fotografías. Para poder llevar a cabo estos objetivos, se crean varios modelos clasificadores de imágenes en TensorFlow que se entrenan a partir de una clasificación manual previa. Los resultados permiten, entre otras cuestiones, identificar cuáles son los conjuntos paisajísticos más fotografiados, lo que admite claves interpretativas desde el punto de vista de la movilidad turística y del propio paisaje en el que tiene lugar.

Palabras-clave: paisaje, fotografías, inteligencia artificial, movilidad turística.

1. INTRODUCCIÓN

El análisis de la movilidad turística ha adquirido una importancia creciente en los últimos años (Salas-Olmedo et al. 2018), especialmente en contextos culturales y paisajísticos de gran interés como el Camino de Santiago (CS) que, a su vez, ha sido objeto de numerosos estudios por parte de diferentes disciplinas debido a su impacto histórico, social y turístico (Lois González y López, 2012).

La capacidad de entender los patrones de movilidad de los peregrinos y turistas en estos itinerarios es crucial para el desarrollo de políticas sostenibles, así como para la conservación del patrimonio natural y cultural. El uso de nuevas tecnologías y fuentes de datos, incluido el Big Data, junto con las posibilidades que puede ofrecer la inteligencia artificial (IA), presenta oportunidades únicas para mejorar y profundizar en el análisis y la comprensión de esos patrones y su relación con el entorno en el que se producen. Por otra parte, el empleo de fotografías georreferenciadas como fuente para el estudio de patrones de movilidad ha experimentado interesantes avances en los últimos años, aplicándose en diferentes contextos territoriales (Barros et al., 2020; Domènech et al., 2020), así como en el estudio del paisaje (Ávila Callau et al., 2019; Figueroa-Alfaro y Tang, 2017).

En el presente trabajo se explora las fotografías tomadas en el entorno rural de las diferentes rutas de peregrinación del Camino de Santiago por parte de los usuarios de la red social Flickr. Estas imágenes, acompañadas de su información de geolocalización, podrían ser una interesante fuente de información sobre los lugares de mayor interés y los flujos turísticos, así como sobre los diferentes paisajes existentes y los principales elementos de interés a lo largo de las rutas. Aprovechando esta riqueza de datos, el uso de algoritmos avanzados de IA, como los ofrecidos por TensorFlow, facilita el reconocimiento automático de las temáticas de las imágenes que enriquece la identificación de paisajes de interés y, en consecuencia, las necesidades de movilidad para llegar a ellos. TensorFlow es una plataforma de aprendizaje automático ampliamente utilizada

(Abadi et al. 2016) que ha demostrado ser eficaz en el reconocimiento automático de fotografías (Hou, 2020). El análisis de las fotografías del Camino de Santiago con estos algoritmos podría ayudar a revelar información clave sobre las rutas más frecuentadas, los puntos de mayor valor paisajístico y cultural, así como los flujos y estacionalidad del turismo. La información generada sería de gran valor para estudios más amplios sobre la relación entre el paisaje, la movilidad y el turismo, contribuyendo a una planificación más informada y sensible al entorno natural y cultural.

En el contexto de esta investigación, hemos considerado que se trata de una fotografía de paisaje cuando esta cumple con una serie de requisitos concretos formales y de contenido, concretamente, que respondan a planos panorámicos e incluyan un mínimo de elementos del territorio que permitan una diferenciación. No se trata tanto de asumir una definición de paisaje en concreto, si bien en este sentido el Convenio Europeo del Paisaje vino a proporcionar una definición ya ampliamente reconocida, sino de seguir criterios operativos que permitan diferenciar las fotografías de paisajes del resto de fotografías, haciendo así factible el entrenamiento de los modelos de reconocimiento automático.

Los resultados que se muestran en este trabajo se han centrado en los primeros esfuerzos para conseguir una clasificación automática de casi 5000 fotografías descargadas (aquellas cuya georreferenciación las sitúa en el entorno rural de las rutas del Camino de Santiago). En esta clasificación primaria hemos conseguido diferenciar las -fotografías de paisajes- del resto de fotografías que capturan otros elementos puntuales de cualquier naturaleza. Al disponer de la geolocalización de las fotografías, estas se han podido asignar, inicialmente, a alguno de los conjuntos paisajísticos del Atlas Nacional de España (la clasificación de orden superior dentro del Atlas de Paisajes de España (Mata Olmo y Sanz Herráiz, 2003). Se trata de resultados muy satisfactorios que van a suponer una base fundamental para profundizar en una clasificación más detallada según se avance en el proceso de entrenamiento de la IA y de aprendizaje de los propios autores. Una clasificación más minuciosa podrá proporcionar también información de gran interés para la caracterización de la movilidad turística en torno al Camino de Santiago, ayudando a interpretar los flujos y patrones existentes en estrecha relación con el contexto paisajístico en el que se producen.

2. MATERIALES Y METODOLOGÍA

Para la realización de este estudio se han combinado datos de fuentes de información espacial de organismos públicos junto con fotografías geolocalizadas de la red social Flickr.

Por el lado de los datos de organismos públicos se ha obtenido la capa vectorial de líneas de los Caminos de Santiago según la Federación Española de Asociaciones de Amigos del Camino de Santiago, con más de 16 300 km en España, y la capa vectorial de polígonos de la edición 2018 del CORINE Land Cover (CLC); ambas capas están disponibles en el Centro de Descargas del Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG). También se ha obtenido la capa vectorial de polígonos de los Conjuntos Paisajísticos del Atlas de los Paisajes de España, disponible en el Banco de Datos de la Naturaleza (BDN) del Ministerio para la Transición Ecológica y Reto Demográfico.

Respecto a las fotografías, se ha usado la API de Flickr para buscar, mediante celdas de extensión de búsqueda - en SRS WGS84 (EPSG:4326), y descargar las fotografías y sus datos realizadas en cualquier celda de 0,01º de lado situada total o parcialmente a menos de 1000 m de alguno de los trazados de Caminos de Santiago, desde enero de 2004 hasta diciembre de 2023, ambos incluidos. Cabe señalar que una gran parte de los datos de localización fueron indicados de manera aproximada por los usuarios, especialmente en los primeros años de esta red social. El número total de fotografías obtenidas, con cualquier licencia de uso libre, ha sido de 884 556, realizadas por 11 682 usuarios, de las cuales 106 223 fotografías, de 4022 usuarios, están en entornos rurales según CLC.

La metodología del estudio se ha basado en el entrenamiento de 20 modelos de clasificación de imagen en fotografías de paisajes rurales y en otras fotografías. Con esta clasificación se ha realizado un primer estudio básico sobre qué paisajes captan la atención de los usuarios de la red Flickr.

Para esta comunicación se utilizó la siguiente estrategia exploratoria para el entrenamiento de un modelo de clasificación de fotografías entre “(Sí) es paisaje” o “(No) es paisaje”:

1. Clasificación manual de dos conjuntos de hasta 2000 fotografías de la red Flickr en entornos rurales seleccionadas aleatoriamente en si son o no son fotografías de paisaje rural. Cada uno de los conjuntos fue inicialmente clasificado por cada una de las autoras de esta comunicación y validado por la otra. En esta

etapa, además, se discutieron aspectos relacionados con qué elementos y composición debía tener una fotografía para ser considerada paisaje rural y la relevancia de algunos elementos en ellas, como perspectiva, presencia de personas, detalles de plantas o animales.

2. Creación de varios modelos clasificadores de imágenes en TensorFlow según la clasificación del punto anterior. Para este proceso se decidió entrenar a un total de 20 modelos basados en EfficientNetV2 (Tan y Le, 2021), tamaño B0, con paquetes de 32 imágenes y 15 repeticiones para calibrar el modelo - aprendiendo de la repetición anterior. Cada modelo fue entrenado con diferentes conjuntos con el 80% fotografías clasificadas en el punto anterior, al que se le sumaban copias alteradas en rotación, volteo y tamaño de encuadre de fotografías de dicho conjunto para evitar modelos sobreajustados. Cada modelo tiene casi 6 millones de parámetros a calibrar.

3. Clasificación automática de un conjunto de 4834 fotografías según los modelos anteriores y validación manual e interpretación de los resultados de la clasificación. Como resultado, se obtienen, para cada fotografía, dos valores numéricos: uno que representa en cuántos modelos dicha fotografía era clasificada como paisaje; y el segundo valor numérico es la probabilidad que reportaba de certeza de haber clasificado correctamente cada fotografía (mayor del 50%). Algunas fotografías de este conjunto pueden haber sido usadas también en el primer paso.

4. Validación manual de las fotografías de los conjuntos del primer paso, incorporando aprendizaje sobre cómo los modelos clasificaron las fotografías para mejorar los conjuntos de entrenamiento.

3. RESULTADOS

Solamente 1384, el 28,63%, fotografías han sido clasificadas como paisajes. Sin embargo, la gran mayoría de ellas han sido clasificadas como tal por más de 15 modelos diferentes (Figura 1), otorgando valores probabilidad de ser clasificados como paisajes mayoritariamente entre el 54% y el 73%. Ninguna fotografía obtuvo valores superiores al 80%.

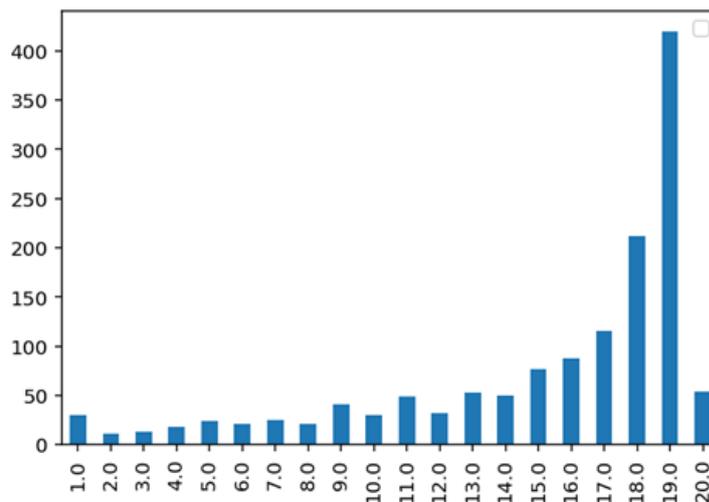


Figura 1. Número de fotografías clasificadas según si son o no paisaje.

La validación posterior a la aplicación de los modelos apenas reclasificó manualmente unas pocas decenas de fotografías de paisajes como no paisajes, siendo todas ellas catalogadas como paisaje por menos de 5 modelos y con el mejor valor de probabilidad de clasificación correcta cercanos al 50%, lo que indicaba que la clasificación realizada podía atribuirse a una clasificación aleatoria. Cabe destacar que fotografías como la etiquetada con la letra g (Tabla 1) ha supuesto un reto para los modelos ya que sus patrones son parecidos a fotografías de paisajes como el mostrado en la fotografía etiquetada con la letra c, aunque sus valores de clasificación como fotografía de paisaje eran parecidos.

Tabla 1. Ejemplos de fotografías clasificadas automáticamente, con nombre del autor y su nombre usuario en Flickr.

SÍ	 a) Aleksandr Zykov - 4292292@N00	 b) srbato - bato	 c) Manel - manel	 d) Marcin Bajer - rrrodrigo
NO	 e) Fran Villena - zzvillano	 f) Lee Kyung-joon - alog-blog	 g) Contando Estrelas - elentir	 h) Tom - tomstravels-com

Como se puede apreciar en la Figura 2, la gran mayoría de fotografías del conjunto aleatorio usado para probar los modelos, tanto clasificadas como paisajes como no, se encuentran situadas en los Caminos de Santiago más conocidos, destacando especialmente los Caminos del Norte (fotografías e y c), el Portugués (fotografía g) y el Francés (fotografías b y f).

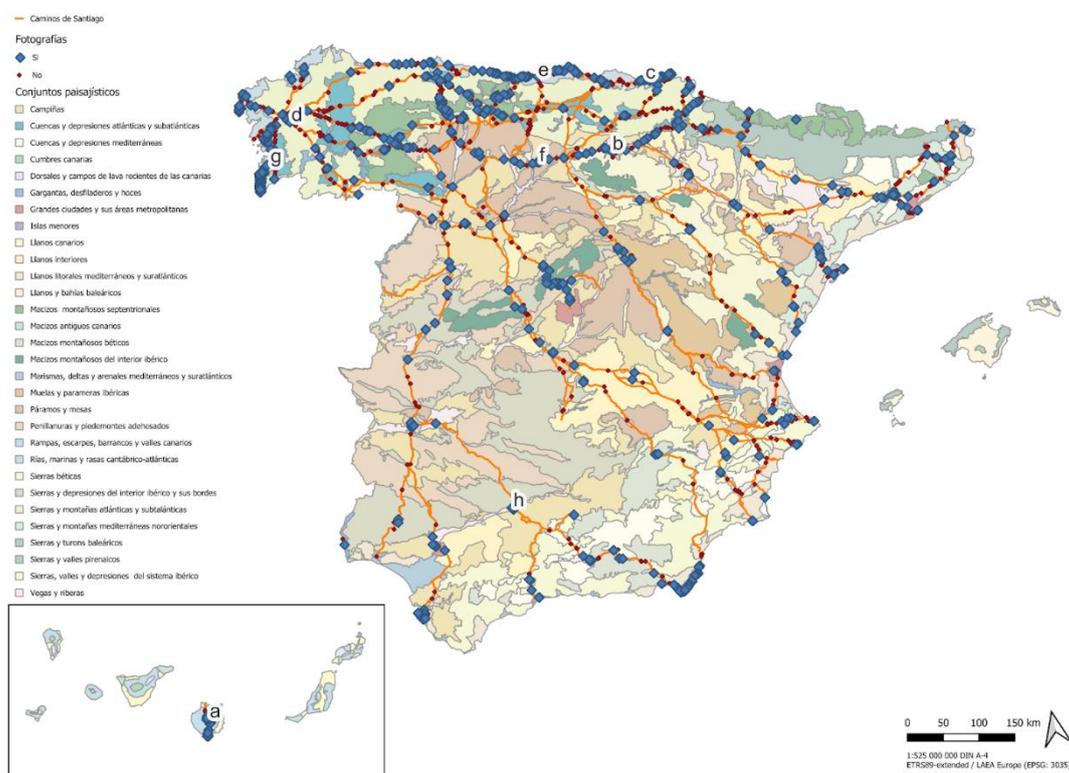


Figura 2. Mapa de la localización de las fotografías clasificadas por los modelos IA según si son o no paisajes.

Al cruzar la información de geolocalización de las fotografías clasificadas con los conjuntos paisajísticos del Atlas Nacional de España, se ha encontrado que mayor parte de las fotografías se han realizado en 5

conjuntos paisajísticos (rías, marinas y rasas cantábrico-atlánticas; sierras y montañas atlánticas y subatlánticas; vegas y riberas; llanos interiores; geolocalizados en el mar) de los 25 + 1 existentes tal y como se muestra en la Tabla 2. Esto se puede interpretar como una mayor presencia de visitantes en dichos conjuntos. Por otra parte, llama la atención que, en todos estos conjuntos, la mayoría de fotografías no han sido clasificadas como paisajes, presentando el mayor porcentaje de fotografías de paisajes el conjunto paisajístico de sierras y montañas atlánticas y subatlánticas (41,38%). De hecho, los conjuntos paisajísticos con mayor porcentaje de fotografías clasificadas como paisajes son las cumbres canarias (72,55%) y los macizos montañosos septentrionales (55,56%).

Tabla 2. Fotografías clasificadas en paisaje o no paisaje por conjunto paisajístico.

	Conjunto paisajístico	Longitud [km]	Total [#] (# fotos / 100 km)	Sí - Foto paisaje [%]		Conjunto paisajístico	Longitud [km]	Total [#] (# fotos / 100 km)	Sí - Foto paisaje [%]
1	Rías, marinas y rasas cantábrico-atlánticas	1165,3	825 (70,8)	34,55	15	Macizos montañosos septentrionales	261,1	72 (27,6)	55,56
2	Sierras y montañas atlánticas y subatlánticas	2386,5	812 (34,0)	41,38	16	Sierras y valles pirenaicos	324,1	67 (20,7)	13,43
3	Vegas y riberas	1147,8	412 (20,4)	20,39	17	Sierras, valles y depresiones del sistema ibérico	741,6	58 (7,8)	12,07
4	Llanos interiores	1609,5	343 (10,8)	10,79	18	Macizos montañosos béticos	106,6	57 (53,5)	15,79
5	Mar (geolocalización)	-	336 (-)	36,90	19	Marismas, deltas y arenales mediterráneos y suratlánticos	149,7	56 (37,4)	37,50
6	Cuencas y depresiones mediterráneas	750,6	269 (35,8)	6,32	20	Cumbres canarias	28,0	51 (182,1)	72,55
7	Sierras y montañas mediterráneas nororientales	261,7	246 (94,0)	31,30	21	Páramos y mesas	991,4	47 (4,7)	21,28
8	Grandes ciudades y sus áreas metropolitanas	204,7	236 (115,3)	16,53	22	Muelas y parameras ibéricas	349,8	45 (12,9)	24,44
9	Cuencas y depresiones atlánticas y subatlánticas	1383,5	235 (17,0)	9,36	23	Llanos canarios	10,5	32 (304,8)	31,25
10	Penillanuras y piedemontes adeshados	868,8	170 (19,6)	35,88	24	Macizos montañosos del interior ibérico	81,4	30 (36,9)	46,67

11	Sierras béticas	591,4	144 (24,4)	39,58	25	Gargantas, desfiladeros y hoces	121,1	24 (19,8)	41,67
12	Campiñas	1623,3	100 (6,2)	30,00	26	Rampas, escarpes, barrancos y valles canarios	39,6	19 (48,0)	36,84
13	Sierras y depresiones del interior ibérico y sus bordes	721,2	75 (10,4)	18,67		TOTAL	16 310,9 *	4834 (27,6) **	28,63
14	Llanos litorales mediterráneos y suratlánticos	391,7	73 (18,6)	21,92		*solo tramos terrestres **sin contar fotografías geolocalizadas en mar			

4. CONCLUSIONES

En este trabajo exploratorio hemos sentado las bases para la aplicación de algoritmos de entrenamiento que permitan la clasificación primaria de fotografías geolocalizadas del Camino de Santiago en función de si corresponden o no a fotografías de paisajes por los que discurren las diferentes rutas.

Un primer resultado permite evidenciar dónde se han tomado más fotografías, lo que se puede relacionar, por tanto, con una mayor presencia de visitantes. Concretamente, los caminos más fotografiados son los Caminos del Norte, Camino Francés y Camino Portugués.

Tras la creación de varios modelos con TensorFlow, que hemos entrenado sobre la base de una primera muestra de fotografías clasificadas manualmente, hemos conseguido obtener una clasificación automática de las fotografías según si corresponden o no a paisajes.

Estos y otros resultados obtenidos en este trabajo auguran la posibilidad en el futuro de conseguir una clasificación rápida y acertada de paisajes entre las inmensas colecciones de fotografías que están disponibles en la actualidad en medios digitales. Ello puede ayudar a una mejor y más eficiente definición de estrategias de movilidad turística y de caracterización paisajística del Camino de Santiago.

Estos primeros avances también han permitido a los autores el plantearse cuestiones que deben tenerse en cuenta en futuros trabajos. Vislumbramos una oportunidad de continuidad de esta propuesta a partir de la clasificación de paisajes progresivamente más ambiciosas en función del proceso de aprendizaje tanto de la IA como de los propios autores/investigadores.”.

AGRADECIMIENTOS

Esta comunicación es parte del proyecto PID2021-127499OB-I00 (TourMobility) financiado por MICIU/AEI/10.13039/501100011033/ y por FEDER, EU.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Abadi, M. et al. (2016). “TensorFlow: A system for large-scale machine learning”. En K. Keeton y T. Roscoe (Eds.), *12th USENIX Symposium on Operating Systems Design and Implementation*. Savannah, USENIX. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1605.08695>
- Ávila Callau, A., Pérez, M., Jurado Rota, J. Serrano Giné, D. (2019). Landscape characterization using photographs from crowdsourced platforms: content analysis of social media photographs. *Open Geosciences*, 11(1), 558-571. <https://doi.org/10.1515/geo-2019-0046>
- Barros, C., Moya-Gómez, B., Gutiérrez, J. (2020). Using geotagged photographs and GPS tracks from social networks to analyse visitor behaviour in national parks. *Current Issues in Tourism*, 23 (10), 1291-1319. <https://doi.org/10.1080/13683500.2019.1619674>
- Domènech, A., Mohino, I., Moya-Gómez, B. (2020). Using Flickr Geotagged Photos to Estimate Visitor Trajectories in World Heritage Cities. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(11), 646. <https://doi.org/10.3390/ijgi9110646>

- Figuroa-Alfaro, R. W., Tang, Z. (2016). Evaluating the aesthetic value of cultural ecosystem services by mapping geo-tagged photographs from social media data on Panoramio and Flickr. *Journal of Environmental Planning and Management*, 60(2), 266–281. <https://doi.org/10.1080/09640568.2016.1151772>
- Hou, Y. (2020). Photo content classification using convolutional neural networks. *Journal of Physics: Conference Series*, 1651. <http://doi.org/10.1088/1742-6596/1651/1/012179>
- Lois González, R. C., López, L. (2012). El Camino de Santiago: una aproximación a su carácter polisémico desde la geografía cultural y el turismo. *Documents d'Anàlisi Geogràfica*, 58(3), 459–479. <https://doi.org/10.5565/rev/dag.6>
- Matal Olmo, R., Sanz Herráiz, C. (Dir.) (2003). *Atlas de los Paisajes de España*. Centro de Publicaciones. Madrid, Ministerio de Medio Ambiente.
- Salas-Olmedo, M.H., Moya-Gómez, B., García-Palomares, J.C., Gutiérrez, J. (2018). Tourists' digital footprint in cities: Comparing Big Data sources. *Tourism Management*, 66 (June 2018), 13-25. <https://doi.org/10.1016/j.tourman.2017.11.001>
- Tan, M., Le, Q. (2021). Efficientnetv2: Smaller models and faster training. *International conference on machine learning*, 10096-10106.

Desarrollo de una base de metadatos para las actas de los congresos del Grupo de Tecnologías de la Información Geográfica (2000-2022): un análisis exploratorio

A. Nieto Masot¹, J de la Riva Fernández², B. Zaragoza³, A. Zabala Torres⁴, F. B. Galacho Jiménez⁵, M. Ruíz-Pérez⁶

¹ Departamento de Arte y Ciencias del Territorio, Facultad de Filosofía y Letras, Universidad de Extremadura.

² Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio, Facultad de Filosofía y Letras, Universidad de Zaragoza.

³ Departament de Geografia, Facultat de Turisme i Geografia, Universitat Rovira i Virgili.

⁴ Departament de Geografia, Facultat de Filosofia i Lletres, Universitat Autònoma de Barcelona.

⁵ Departamento de Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, Universidad de Málaga.

⁶ Departament de Geografia, Facultat de Filosofia i Lletres, Universitat de les Illes Balears.

ananieto@unex.es, delariva@unizar.es, benito.zaragozi@urv.cat, alaitz.zabala@uab.cat, fbgalacho@uma.es, maurici.ruiz@uib.es

RESUMEN: La investigación en Tecnologías de la Información Geográfica es una línea de gran tradición en la geografía española. Entre las contribuciones más destacadas en este campo se encuentran los congresos bianuales del Grupo de TIG de la Asociación Española de Geografía, los cuales han servido como plataforma para mostrar avances y temas relevantes en la geografía española. Este estudio presenta un primer tratamiento de las actas de los congresos celebrados entre 2000 y 2022, con el objetivo de crear una base de metadatos que sistematice y facilite el acceso a la información de dichas contribuciones. En esta comunicación, se realiza uno de los primeros usos de esta base, proporcionando una visión de conjunto preliminar de las temáticas y enfoques abordados en los congresos. Aunque aún existen registros que requieren completarse o revisarse, la base de datos ya permite extraer tendencias iniciales. Para este análisis se han utilizado herramientas de *software* libre, tanto para la extracción y preparación de los metadatos como para la creación de gráficos y nubes de palabras que visualizan de forma preliminar las conexiones y patrones en la producción científica. Este primer acercamiento permite explorar la evolución de las Tecnologías de la Información Geográfica en la geografía española de manera accesible y visual y sentar las bases para estudios más detallados sobre la evolución de las TIG.

Palabras-clave: bibliometría, congresos TIG, metadatos.

1. INTRODUCCIÓN

El Grupo de Trabajo en Tecnologías de la Información Geográfica (TIG) de la Asociación Española de Geografía (AGE) ha sido una piedra angular en el ámbito de las tecnologías geográficas en España desde su fundación en 1985. Surgió como iniciativa en el marco del II Coloquio de Geografía Cuantitativa que se organizó en la Universidad Complutense de Madrid (Martínez-Vega, 2013). Este grupo se creó en el seno de la AGE, siendo el primero que incluye en su nombre terminologías adoptadas en la evolución de la geografía como disciplina científica desde mediados del siglo XX con la incorporación de enfoques cuantitativos y técnicas estadísticas aplicadas a problemas geográficos. La creación de este grupo se sitúa en el contexto de la profesionalización y especialización de la geografía en España al aplicar métodos matemáticos y estadísticos a la investigación geográfica para lograr una mayor precisión y objetividad y por ello, su primer nombre es Grupo de Métodos Cuantitativos. Desde su creación, se ha mantenido en una cifra aproximada de 110 socios/as y mayoritariamente son geógrafos y geógrafas españoles que trabajan con TIG en universidades y organismos públicos de investigación. En menor medida también lo forman profesionales relacionados con las ciencias de la tierra, medio ambiente y la ordenación del territorio tanto españoles como extranjeros, principalmente iberoamericanos.

El grupo es conocido por organizar congresos científico-técnicos bianuales que atraen a científicos y

científicas nacionales e internacionales para debatir los últimos avances en TIG. Además, organiza cursos de formación y talleres, publica libros y actas, y participa en otras actividades de la AGE, todas enfocadas en la aplicación y desarrollo de las TIG en la ordenación del territorio.

Para mostrar una breve evolución de la historia del Grupo y su aportación en la evolución de las TIG dentro de la Geografía Española se muestra la evolución de estos Coloquios. Los seis primeros coloquios celebrados en Oviedo, Madrid, Cáceres, Illes Balears, Zaragoza y Málaga se titularon Coloquios del Grupo de Métodos Cuantitativos o de Geografía Cuantitativa. Su preocupación era sentar unas bases metodológicas y epistemológicas de la geografía cuantitativa española. La evolución de la disciplina, el avance en la cartografía digital, los sistemas de información geográfica y la obtención de imágenes de satélite, plantea al Grupo nuevos enfoques y el cambio del nombre. No sólo se estudia la geografía desde la estadística o los métodos cuantitativos, sino que se utilizan nuevos datos para medir y observar el territorio (teledetección, fotogrametría, GPS...) y se emplean nuevos procedimientos en visualización geográfica basados en nuevos dispositivos informáticos y el avance de las técnicas de análisis (Bosque, 2012). Por ello, a partir del Coloquio celebrado en la Universidad Autónoma de Barcelona (1998), el Grupo y sus encuentros toman el nuevo nombre de Métodos Cuantitativos, Sistemas de Información Geográfica y Teledetección, que se transforma en Grupo de Tecnologías de la Información Geográfica desde el congreso de Granada (2006). Este artículo se centra en el período 2000-2022, a partir del celebrado de Alcalá de Henares (2000), cubriendo un total de 10 congresos bienales (sin congreso en 2020 debido a la COVID-19), que se muestran en la Figura 1.

La etapa actual surge de la necesidad de englobar estas tendencias bajo un término unificado que refleje el avance de la disciplina y abarque sus diversas aplicaciones e innovación tecnológica; incluyendo el acceso a nuevos datos como la teledetección hiperespectral y LIDAR, así como la revolución en los sistemas de acceso a datos geográficos gracias a iniciativas como INSPIRE (Martínez-Vega, 2016) o la aparición de los globos virtuales que son un reflejo de estos avances; de aquí el cambio de nombre, tanto del Grupo como de las reuniones científicas, a partir de 2006.

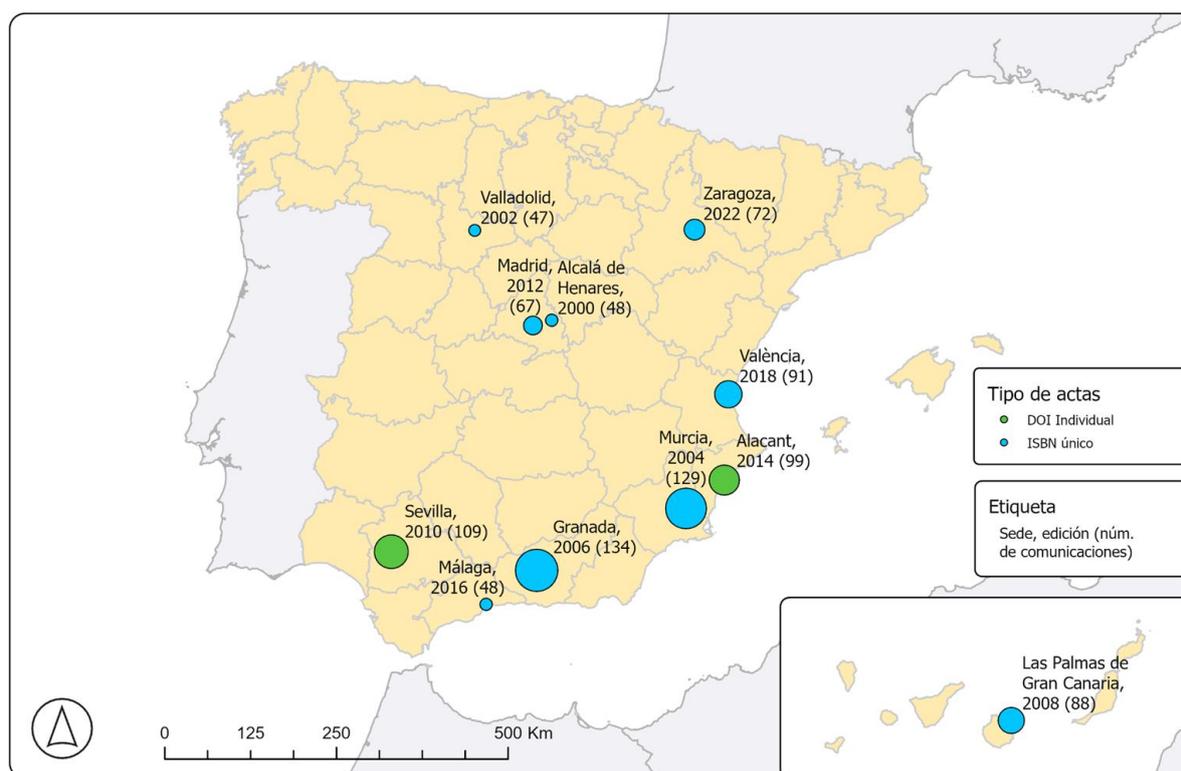


Figura 1. Ubicación y número de comunicaciones de los congresos analizados.

El objetivo general de todos estos Coloquios ha sido promover el avance y la difusión de las TIG y se han convertido en una importante plataforma académica y profesional, centrada en el desarrollo y su aplicación en diversas disciplinas geográficas del ámbito español. Partiendo del contexto de la serie de coloquios, los objetivos de este trabajo son dos:

1. Realizar un primer tratamiento exploratorio de la evolución de los tópicos y focos de investigación

clave en las comunicaciones de los últimos 10 coloquios del Grupo, identificando algunas tendencias y áreas emergentes en las Tecnologías de la Información Geográfica. Nos hemos centrado en este periodo más reciente, aunque se pretende en futuros trabajos realizar el mismo proceso desde los inicios del Grupo con el Coloquio celebrado en Oviedo en 1983.

2. Desarrollar un enfoque sistemático inicial para la conservación digital y el archivo de las comunicaciones de las conferencias, sentando las bases para garantizar la accesibilidad a largo plazo y la normalización del conjunto de datos.

Este doble enfoque se ajusta tanto a las necesidades académicas como a las prácticas, proporcionando valiosos conocimientos a la comunidad TIG y contribuyendo a la preservación de su patrimonio intelectual. La evolución de las TIG en la geografía española se había analizado previamente en trabajos como el análisis bibliométrico de las publicaciones de los geógrafos españoles en *Geofocus* y *Revista de Teledetección* que realizó Chuvieco et al. (2008), actualizado por Martínez Vega (2016) al incorporar además las revistas del *Boletín de la AGE* y *Estudios de Geográficos* o el capítulo de Martínez Vega (2013), donde analizó la evolución del Grupo hasta ese momento. Pero este nuevo enfoque, analizar los coloquios de los últimos 20 años, pretende no sólo analizar la trayectoria histórica e intelectual de las TIG en la geografía española, sino también preservar y normalizar el corpus de trabajo para su futura accesibilidad y uso académico, abordando tanto los aspectos académicos como prácticos del archivo y la gestión de datos.

2. METODOLOGÍA

Para llevar a cabo el análisis de las actas de los 10 últimos congresos del Grupo de TIG de la AGE se realizó un proceso sistemático de extracción y preparación de datos. Primero, todas las actas se separaron en archivos PDF individuales, uno por cada comunicación, utilizando scripts en *bash* que hacen uso de librerías comunes de Linux como *pdftotext* para extraer automáticamente los metadatos principales (título, autores, palabras clave, resumen y números de página).

En los casos de comunicaciones más antiguas, donde no era posible extraer el texto automáticamente debido a la calidad o el formato de los documentos, se utilizó la librería de OCR *Tesseract*, también bajo Linux. Esta herramienta permite convertir las imágenes escaneadas en texto digital, facilitando así su integración en el conjunto de datos. *Tesseract* es una librería de código abierto ampliamente usada en Linux para reconocimiento óptico de caracteres (OCR), y resulta efectiva para digitalizar documentos escaneados y mejorar la precisión de extracción de datos en textos no digitales.

Una vez extraídos los metadatos, se procedió a completar manualmente cualquier información faltante o inconsistente para cada congreso, asegurando así la uniformidad y coherencia del conjunto de datos. Además, se revisaron exhaustivamente todos los metadatos para detectar posibles errores, especialmente en las comunicaciones tratadas con OCR.

Las dos primeras conferencias (Alcalá de Henares 2000 y Valladolid 2002) requirieron una preparación adicional, ya que carecían de formatos normalizados para los resúmenes y las palabras clave. De manera provisional, se utilizó *ChatGPT 4* para redactar los metadatos faltantes y así tener una base de datos más completa. Los textos generados por la IA reflejan razonablemente bien los contenidos de las comunicaciones y el enfoque.

Las palabras clave de cada comunicación se clasificaron manualmente en diversas categorías predefinidas para facilitar un análisis posterior más detallado. Las categorías incluyeron: área de estudio/escala, datos, *hardware/software*, indicadores/métricas, organización/marcos/estándares, sistemas de información, técnicas/análisis y temática. Posteriormente, se realizó una validación cruzada por parte de los autores para establecer un consenso. Por ejemplo, en la categoría "datos", se agruparon las palabras relacionadas con las fuentes de información empleadas en las investigaciones, así como con los tipos de datos geoespaciales y sus características. Por ejemplo, se incluyeron términos como *datos satelitales*, *imágenes hiperespectrales*, *datos de radar*, *LIDAR*, *datos GNSS/GPS*, y *datos de telefonía móvil*. Esta categoría también abarca las referencias a bases de datos específicas o infraestructuras que almacenan y gestionan dichos datos, como *bases de datos espaciales*, *geoportales*, y *repositorios de datos abiertos*. De esta manera, se facilita el análisis de la variedad y la evolución de las fuentes y tipos de datos utilizados en las comunicaciones a lo largo de los años. Estas clasificaciones son provisionales y sujetas a posibles cambios, pero resultan útiles para una primera aproximación.

Para el análisis preliminar, se utilizaron herramientas y librerías en R, como *dplyr* para la manipulación de datos y *ggcloud* para la creación de nubes de palabras, visualizando las tendencias y patrones en las co-

municaciones a lo largo de los congresos. Este enfoque visual proporcionó un primer vistazo general y accesible a los temas predominantes en las TIG en la geografía española durante el periodo estudiado. A modo de ejemplo, nos centramos en la categoría “datos” para ilustrar el tipo de análisis que se puede realizar a partir de dichos metadatos.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Base de metadatos

En nuestro análisis de las actas de los 10 congresos celebrados entre 2000 y 2022, se logró compilar una base de datos que incluyó un total de 932 comunicaciones. De estas, 31 no pudieron ser localizadas en formato PDF, ya que correspondían a ponencias invitadas o conferencias que no fueron documentadas de manera estándar. No obstante, la mayoría de las comunicaciones restantes se integraron exitosamente en la base de datos.

En los congresos de Sevilla y Alicante, las comunicaciones fueron archivadas e indexadas directamente en los repositorios institucionales de sus respectivas universidades, lo que permitió tener 208 comunicaciones ya indexadas y fácilmente citables mediante identificadores permanentes (*handle*). Esta práctica facilita la accesibilidad y la citabilidad de estas comunicaciones. Para los demás congresos, todas las actas contaron con ISBN, y las ediciones más recientes recibieron además un DOI colectivo que abarca todas las comunicaciones del evento. Esto representa un mínimo deseable para garantizar la visibilidad y accesibilidad de los estudios presentados.

El congreso de Murcia, en particular, presentó un desafío técnico, ya que las 126 comunicaciones disponibles requerían aplicar OCR debido a problemas de codificación de caracteres (UTF-8, Win1252, etc.). Estos documentos, probablemente generados en sistemas Mac en 2004, presentaban un formato incompatible con las librerías de extracción de texto comunes como las utilizadas por *pdftotext*, lo que hizo necesaria la aplicación de OCR para asegurar su digitalización y normalización en la base de datos.

En la fase de normalización y clasificación de metadatos se utilizó *ChatGPT* para generar automáticamente resúmenes y palabras clave para un total de 95 comunicaciones que no disponían de estos elementos según los formatos estandarizados. Esta herramienta permitió agilizar el proceso y generar una base inicial sobre la cual se realizaron revisiones manuales para asegurar la precisión y relevancia de la información generada. En particular, las comunicaciones tratadas con OCR fueron revisadas con mayor detalle para detectar y corregir posibles errores en la extracción del texto.

Además, en 264 comunicaciones no se encontraron números de página asociados, aunque se identificaron a partir de su posición relativa en el conjunto de actas de cada congreso, lo que asegura su trazabilidad en la base de datos.

3.2. Análisis preliminar

A partir de la nueva base de datos compilada, se realizaron análisis iniciales con el fin de ofrecer una primera inspección de los patrones y tendencias en las comunicaciones presentadas en los congresos del Grupo de TIG. Estos análisis tienen un carácter exploratorio y están diseñados para establecer una visión preliminar de los datos sin pretender exhaustividad.

Este análisis muestra cómo ha evolucionado el volumen de contribuciones a lo largo del tiempo. En la Figura 2 se observa un incremento constante desde los primeros coloquios, con 21 comunicaciones en Oviedo (1983), hasta llegar a las 72 comunicaciones en Zaragoza (2022). Esta tendencia ilustra el crecimiento y la consolidación del grupo como un foro relevante en la geografía española.

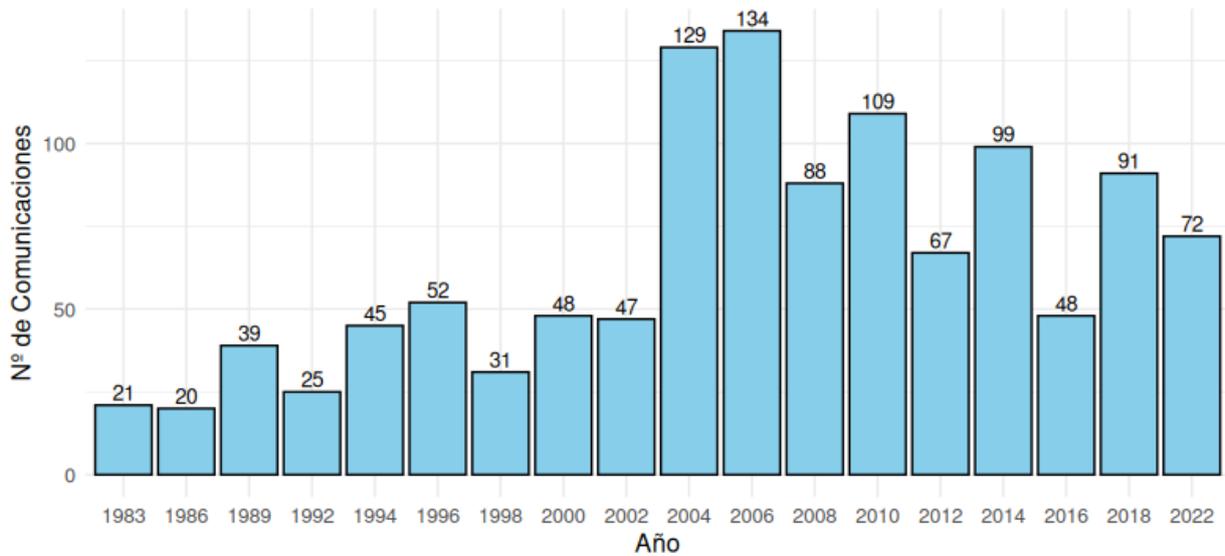


Figura 2. Número de comunicaciones de los congresos del grupo en todo el período 1983-2022. En este artículo se analizan los 10 congresos desde el año 2000 al 2022.

La Figura 3 presenta la distribución del número de autores en las comunicaciones de los últimos 10 congresos (2000-2022). La media se ha mantenido en 3-4 autores por comunicación, reflejando la tendencia a la colaboración y trabajo en equipo en la producción científica en TIG. Aunque la distribución se mantiene relativamente estable, se identifican algunas excepciones con comunicaciones que cuentan con un mayor número de colaboradores.

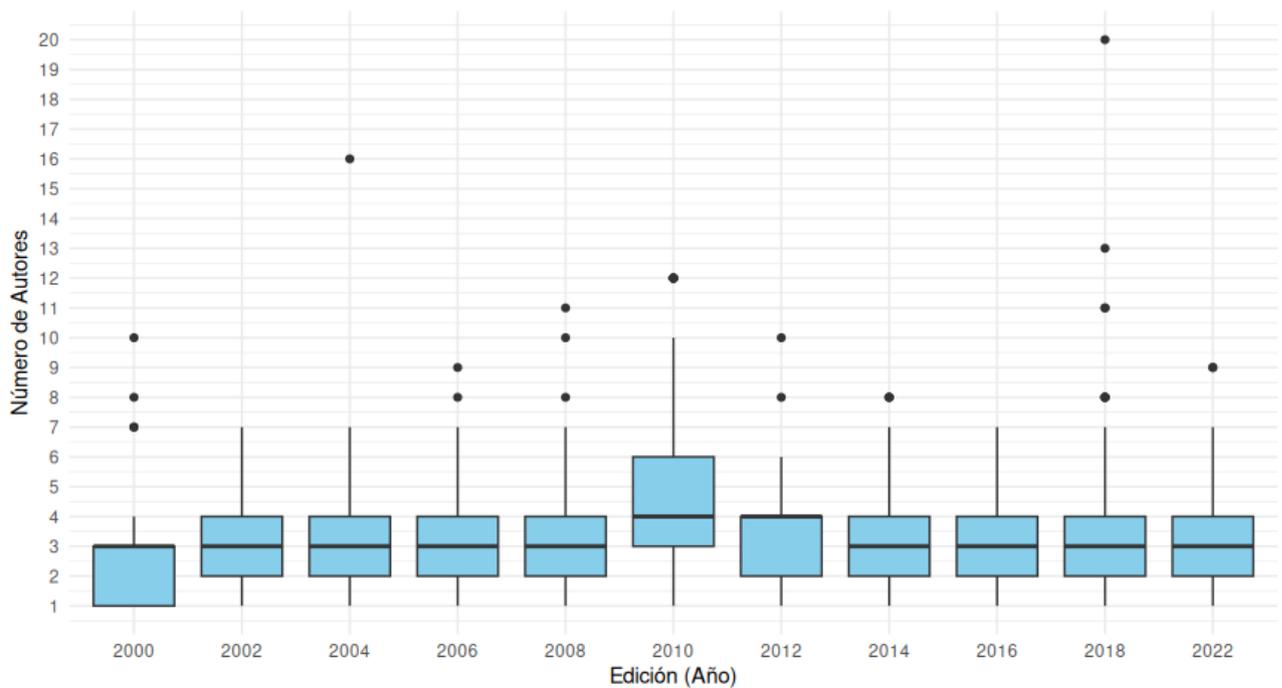


Figura 3. Distribución de número de autores por comunicación en los congresos del grupo desde 2000 a 2022.

Con el objetivo de explorar los temas predominantes y emergentes en las comunicaciones de los congresos, se realizó un proceso de clasificación de las palabras clave en diversas categorías: área de estudio/escala, datos, *hardware/software*, y técnicas de análisis. Esta categorización facilitó la interpretación de los términos y permitió identificar de manera más precisa las áreas de enfoque. Posteriormente, se utilizaron estas categorías para crear nubes de palabras específicas por cada categoría, empleando la librería *ggcloud* en R. Estos gráficos segregados por facetas presentan una representación visual de los términos más frecuentes en cada categoría y edición del congreso, facilitando una comparación directa entre los congresos a lo largo de los últimos 20 años. En la Figura 4 presentamos un ejemplo de dichas nubes de palabras, correspondiente a la categoría "datos". Este gráfico permite observar cómo algunos términos han ido ganando relevancia, reflejando la evolución y las nuevas tendencias en el uso de tecnologías y métodos en el ámbito de las TIG. En cada nube de palabras se muestran las palabras con distintos tamaños de fuente según la frecuencia de aparición y solamente se muestran palabras mientras queda espacio disponible, evitando así solapamientos.

En las primeras ediciones (2000-2006), las palabras más frecuentes sobre orígenes de datos se centran en tecnologías básicas de cartografía y bases de datos espaciales, con un enfoque en la digitalización y desarrollo de infraestructuras de datos. Esto indica un enfoque en la profesionalización y establecimiento de metodologías de trabajo en el uso de TIG. En cambio, en las ediciones más recientes (2008-2022) se observa una diversificación de temas, con palabras clave que incluyen Big Data, Sentinel, y geoportales, lo que refleja una expansión en el uso de tecnologías avanzadas y una integración más compleja de sistemas para el análisis y visualización de datos espaciales.

Las palabras relacionadas con satélites como Landsat, Sentinel, y MODIS son recurrentes en múltiples ediciones de los congresos, lo que indica un enfoque continuo en el uso de imágenes satelitales y observación de la Tierra como fuente de datos clave para estudios y aplicaciones geográficas. Esto muestra la importancia sostenida de estas plataformas en la comunidad científica y su papel fundamental en la cartografía y el monitoreo de cambios ambientales.

El término LIDAR aparece de forma consistente, subrayando su relevancia en la generación de modelos de elevación y otros análisis 3D. Su frecuencia sugiere un incremento en la popularidad y aplicación de esta tecnología, especialmente en la cartografía de precisión y estudios topográficos.

En ediciones más recientes, términos como datos de telefonía móvil y geolocalización sugieren una tendencia hacia el uso de datos generados por dispositivos móviles y aplicaciones de localización automática (apps). Esto refleja el interés en las aplicaciones de TIG para análisis de movilidad y estudios urbanos. Big Data es un término recurrente, indicando un interés creciente en la integración y análisis de grandes volúmenes de datos geoespaciales. La aparición de términos asociados como geoportales y bases de datos espaciales destaca la tendencia hacia la infraestructura de datos espaciales y la necesidad de herramientas para manejar, visualizar y analizar grandes conjuntos de datos de manera eficiente.

El uso de imágenes hiperespectrales y tecnologías de alta resolución también se menciona en varias ediciones, lo que subraya la evolución hacia técnicas más avanzadas y precisas en teledetección. Esto indica un progreso en la adopción de tecnologías que permiten un análisis más detallado y específico de las características del terreno.



Figura 4. Nubes de palabras de la categoría "datos", por edición del congreso. Este gráfico ilustra la frecuencia y prominencia de los términos relacionados con las técnicas utilizadas en TIG, destacando aquellas que han ganado mayor relevancia en los últimos años.

*n: número de palabras únicas; docs: número de publicaciones; ratio: número de palabras por publicación.

4. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

El análisis preliminar de las actas de los 10 congresos del Grupo de TIG ha permitido establecer una base de datos sólida y accesible que incluye 932 comunicaciones, un paso crucial para la sistematización y análisis de la evolución de las TIG en España. A través de la separación e individualización de las comunicaciones en archivos PDF, así como la extracción y normalización de metadatos utilizando herramientas automáticas y manuales, se ha avanzado significativamente hacia la accesibilidad y la citabilidad de las comunicaciones.

Sin embargo, persisten desafíos en términos de indexación y accesibilidad de ciertos congresos, especialmente en el caso de las comunicaciones más antiguas y aquellas que no disponen de metadatos completos. El trabajo realizado hasta ahora ha permitido estandarizar y digitalizar gran parte de este corpus, y la aplicación de identificadores permanentes como DOIs y handles en ciertas ediciones facilita la consulta y uso de estas comunicaciones para estudios posteriores.

En esta comunicación se ha ofrecido una exploración general mediante la categorización de palabras

clave y la creación de nubes de palabras para visualizar de manera preliminar las tendencias en las comunicaciones. Aunque estas visualizaciones proporcionan una comprensión inicial de las áreas de enfoque y evolución en las TIG, el potencial completo de esta base de datos aún está por desarrollarse.

Próximamente, será posible llevar a cabo estudios más detallados que aborden la evolución de las TIG a través de las contribuciones presentadas en estos congresos. Esto permitirá identificar no solo las áreas emergentes y las técnicas más utilizadas, sino también analizar el impacto de las comunicaciones en la comunidad científica mediante el uso de indicadores bibliométricos y análisis de citas. Además, se prevé la implementación de herramientas digitales para la consulta y visualización dinámica de los datos, ampliando las posibilidades de exploración e investigación en este campo.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Bosque Sendra, J. (2012): "Las TIG y los modelos de simulación para el estudio del cambio global". En *Aportación española al XXXII Congreso de la Unión Geográfica Internacional, Colonia, 2012*. Nuevos aires en la Geografía Española del Siglo XXI, (pp.15-23). Madrid, Centro Nacional de Información Geográfica.
- Chuvieco, E., Bosque, J., Pons, X., Conesa, C., Santos, J.M., Gutiérrez Puebla, J., Salado, M.J., Martín, M.P., de la Riva, J., Ojeda, J. y Prados, M.J. (2008): ¿Son las Tecnologías de la Información Geográfica (TIG) parte del núcleo de la Geografía? *Boletín de la AGE*, 40: 33-55.
- García-Palomares, J.C. (2022): "Nuevos datos para una nueva presentación de la ciudad: algunas aportaciones" En *Aportación Española al 34º Congreso de la UGI Estambul 2020 El tiempo de los geógrafos. Comité Español de la UGI*, (pp.437-446). Madrid, Centro Nacional de Información Geográfica.
- Martínez-Vega, J. (2013): "Grupo de trabajo de Tecnologías de la Información Geográfica". En Lasanta, T. y Martín Vide, J. (Eds.): *La investigación geográfica en España (1990-2012)*, (pp 485-491). Madrid: AGE, IPE, CCHS.
- Martínez-Vega, J. (2016): "Innovación y nuevas tecnologías para la investigación y la formación geográficas". En *Aportación española al XXXIII Congreso de la Unión Geográfica Internacional Beijing 2016. Crisis, globalización y desequilibrios sociales y territoriales en España*, (pp.188-198). Madrid, Centro Nacional de Información Geográfica.

XX CONGRESO DE TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Tecnologías de la Información Geográfica para la construcción de Territorios Inteligentes



Palma (Mallorca, Illes Balears)
14-16 octubre 2024

ORGANIZA



Universitat
de les Illes Balears



Universitat
de les Illes Balears

Servei
de Sistemes d'Informació
Geogràfica i Teledetecció

SPONSORS



OPEN COSMOS
Oferta Open Cosmos a los asistentes al XX Congreso TIG