CAMBIO CLIMÁTICO, RIESGOS Y TERRITORIO: AVANCES Y RESPUESTAS CIENTÍFICAS

Editores:
P. Dorta Antequera
A. López Díez
J. Díaz Pacheco
J. Correa González
N. Martín Raya

Publicaciones de la
Asociación Española de Climatología (AEC)
Serie A, nº 14
Primera edición, 2026

AEC ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE CLIMATOLOGÍA

GOBIERNO DE ESPAÑA
VICEPRESIDENCIA TERCERA DEL GOBIERNO
MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA Y EL RETO DEMOGRÁFICO
aemet Agencia Estatal de Meteorología

Editores:

Pedro Dorta Antequera, Abel López Díez, Jaime Díaz Pacheco, Jordan Correa González, Nerea Martín Raya

Cambio climático, riesgos y territorio: avances y respuestas científicas

Publicaciones de la Asociación Española de Climatología (AEC)
Serie A, n.º 14

GOBIERNO DE ESPAÑA
VICEPRESIDENCIA TERCERA DEL GOBIERNO
MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA Y EL RETO DEMOGRÁFICO

aemet Agencia Estatal de Meteorología

2026

Índice

Comité 7

Presentación 9

Variabilidad y tendencias de agua precipitable y temperatura en altura sobre la península ibérica a partir de radiosondeos (1973–2025) 14
María José CORDOBILLA CASCALES, Adalberto TEJEDA MARTÍNEZ

Projections of total cloud cover in the canary islands during the 21st century using dynamic downscaling and satellite data 21
Paula SOSA GUILLÉN, Rubén BARRAGÁN CUESTA, Judit CARRILLO PÉREZ, Juan Pedro DÍAZ GONZÁLEZ, Albano GONZÁLEZ FERNÁNDEZ, Juan Carlos PÉREZ DARIAS, Francisco Javier EXPÓSITO GONZÁLEZ

Stochastic Generator of Daily and Subdaily Precipitation through Nested Stochastic Models and Reanalysis Data 26
Juan MARCEN-GUTIERREZ, Jesús ASÍN, Ignacio OJER GARCÍA, Sergio MARTÍNEZ-ARANDA, Jorge CASTILLO-MATEO, Ana C. CEBRIÁN

Added value of regional climate change projections 32
Sixto HERRERA GARCÍA, Fernando GONZÁLEZ TABOADA, Ricardo ANADÓN ÁLVAREZ, Miguel Ángel ÁLVAREZ GARCÍA, Arturo COLINA VUELTA, Juan Carlos FERNÁNDEZ IGLESIAS, Carlos GUARDADO FERNÁNDEZ

Warming and Observational Effective Climate Sensitivity from Long-Term Temperature Records under Free-Tropospheric Conditions 40
Ayoze ÁLVAREZ-HERNÁNDEZ, Rosa D. GARCÍA, Omaira Elena GARCÍA, Marie Maile MCKENZIE, Sara IZQUIERDO, Juan José BUSTOS, Carlos MARRERO, Sergio Fabián LEÓN-LUIS, Pedro Pablo RIVAS-SORIANO2, Enrique REYES, Ramón RAMOS, Carlos TORRES

Cambios en la función de distribución de la temperatura media anual en españa, 1979-2022. 46
Fernando S. RODRIGO

Primeros Pasos Hacia la Emulación Mediante Deep Learning de Modelos Climáticos a Convection Permitting: Una Aplicación en el Proyecto Impetus4Change (I4C) 54
Samuel REYES-ELGUETA, Jose GONZÁLEZ-ABAD, Jorge BAÑO-MEDINA, Jesús FERNÁNDEZ

Modelling seawater pCO_2 in the Canary Islands region based on satellite measurements and machine learning techniques 62
Irene SÁNCHEZ-MENDOZA, Melchor GONZÁLEZ-DÁVILA, David GONZÁLEZ-SANTANA, David CURBELO-HERNÁNDEZ, David ESTUPIÑÁN-SANTANA, Aridane G. GONZÁLEZ and J. Magdalena SANTANA-CASIANO

An overview of climate variability in Izaña Observatory: air temperature, precipitation, sunshine duration, relative humidity and pressure during the 1916-2025 period 71
Rosa D. GARCÍA, Juan José. BUSTOS, Omaira GARCÍA, Carlos TORRES, Ramón RAMOS, Carlos MARRERO, Concepción BAYO, Virgilio CARREÑO, Cándida HERNÁNDEZ, Belén QUEROL and Irene TOVAR2

Statistical analysis of sea breeze over complex terrain with the Meso-nh model and cerra reanalysis 78
Alex SERRA, Aina MAIMÓ-FAR, Maria Antònia JIMÉNEZ

Monitorización de la nubosidad con datos Sentinel-2 y técnicas de Inteligencia Artificial 83
Juan Carlos GONZÁLEZ, Jose Julio RODRIGO, Igor VÁZQUEZ, Airam AMADOR, Daniel ACOSTA

Análisis de la variabilidad espacial de la precipitación en el Noreste Argentino a partir de redes de medición convencionales y no convencionales 96
Raúl ANDRÉS DURÁN , Federico A. ROBLEDO, Leandro B. DÍAZ

Detección y corrección del efecto fin de semana en las series diarias de precipitación 107
José Antonio GUIJARRO PASTOR

Efecto del cambio de precisión en los registros meteorológicos sobre el cálculo de percentiles elevados 112
Elsa BARRIO-TORRES, Zeus GRACIA-TABUENCA, Jesús ASÍN, Eva SIERRA, Brunilda PALACIO, Roberto SERRANO-NOTIVOLI

Modelado y peso de variables en el modelado de temperaturas máximas y mínimas con métodos no-lineales para series anuales 118
David ORGAMBIDES GARCÍA, María José ESTRELA NAVARRO, David CORELL CUSTARDOY, Juan Javier MIRÓ PÉREZ

Análisis de la evolución de la anomalía de temperatura en Canarias entre 1970 y 2024 en el contexto mundial 123
María ALONSO LEÓN , Luis ÁLVAREZ

EMOWA, una base de datos para estudiar el clima histórico del Sahel 129
Fernando S. RODRIGO

A Pilot Urban Heat Service for climate resilience: Co-designing high-resolution heat-stress solutions for European Cities 136
Nieves PEÑA , Daniel NAVARRO, Adrian GLODEANU, Efrén FELIU, Igone GARCÍA, Dirk LAUWAET, Dirk VANDEN BOER, Wout RENKIN, Nele VELDEMAN

Curva de daño para los temporales marítimos de Cantabria 143
Ana COLLAZO-CASTIÑEIRA, Héctor LOBETO , Domingo RASILLA, Carolina GARMENDIA, Francisco Solano ESPEJO GIL, Urko ELOSEGI GURMENDI , Melisa MENENDEZ

La excepcionalidad de los episodios de calor extremo de los veranos de 2022, 2023 y 2025 en Asturias 149
Luis PÉREZ-GARCÍA , Cristina GARCÍA-HERNÁNDEZ , Jesús RUIZ-FERNÁNDEZ

Evolución reciente de los factores dinámicos de la erosión hídrica en la provincia de Almería: erosividad de la lluvia y cobertura del suelo 155
Antonio GALLEGOS REINA

Propagación de la sequía climática a la sequía en el agua subterránea en acuíferos naturales andaluces 162
Paula SERRANO-ACEBEDO y Natalia LIMONES

¿Cómo son los Entornos Convectivos Severos en España? ¿Puede ERA5 representarlos correctamente? 171
Andrés BARRIO-MARTIN , Carlos CALVO-SANCHO , Nuria P. PLAZA-MARTIN , Ana MORATA César AZORÍN-MOLINA

Desplazamientos medioambientales: migración como técnica adaptativa a través de las reubicaciones planificadas 177
Carlota DÍAZ GARCÍA

Integrating Multi-Source Climate Data and Predictive Models to Assess Bioclimatic Stress in Mediterranean Vineyards: An Integrated Multi-Source Study in Padul (Granada, Spain) 184
Lucía MORENO-CUENCA, Thodoris MAXIMILIANOS CHYTIS, Jesús RODRIGO-COMINO

Escenarios pasados y futuros de la disponibilidad de frío y calor para los frutales y la ocurrencia de heladas en Aragón 192
Eduardo PÉREZ SOSA , Roberto SERRANO NOTIVOLI , Miguel Ángel SAZ SÁNCHEZ , María Luz HERNÁNDEZ NAVARRO

Gobernanza de los Sistemas de Alerta Temprana en Risaralda, Colombia: brechas entre planificación, inversión y articulación institucional 200
Alexander GALINDO LÓPEZ

Adaptaciones urbanas ante el exceso de calor. La disminución de la temperatura bajo un toldo piloto en Barcelona 209
Javier MARTÍN-VIDE, María del Carmen MORENO-GARCÍA

El cambio climático en la ordenación territorial de Canarias 215
Eduardo RISUEÑO DÍAZ, Adrián PASCUAL ESPINO, Gustavo PESTANA PÉREZ

Persistencia de heladas mediante probabilidades condicionales al noroeste de España 220
Eduardo PÉREZ SOSA, Roberto SERRANO NOTIVOLI, Miguel Ángel SAZ , María Luz HERNÁNDEZ NAVARRO

Patrones espaciales de los índices de extremos climáticos en Cataluña (1991-2020) 226
Javier MARTÍN-VIDE, Mercè BARNOLAS-VILADES, Antoni BARRERA-ESCODA , Marc PROHOM-DURAN , Aleix SERRA-URÓ

Meteorological drivers of extreme wildfires in 2025 season in Castile and León 232
Alejandro CORBEA-PÉREZ , Eduardo GARCÍA-ORTEGA , Andrés NAVARRO , Tomàs CARDONA-SASTRE , José Manuel FERNÁNDEZ-GUISURAGA y Andrés MERINO

Déficit evaporativo y olas de calor en ciudades andaluzas: implicaciones para la presión hídrica 238
Paula SERRANO-ACEBEDO, Natalia LIMONES y Mónica AGUILAR-ALBA

Los episodios de calor extremo en Asturias entre 2001 y 2025: configuraciones atmosféricas responsables 246
Luis PÉREZ-GARCÍA, Cristina GARCÍA-HERNÁNDEZ, Jesús RUIZ-FERNÁNDEZ , Laura NÚÑEZ DE CON

The role of synoptic and mesoscale circulation in extreme daily rainfall values in the Balearic Islands 252
Miquel TOMAS-BURGUERA, Josep FORTESA, Julián GARCÍA-COMENDADOR , Miquel MIR-GUAL , Roberto SERRANO-NOTIVOLI, Santiago BEGUERÍA , Jaume COMPANY , Francisco CUELLO-LLOBELL , Alexandre MORAGUES , Joan ESTRANY

El papel de la actividad microbiana del suelo en la regeneración natural de *Pinus pinea*: implicaciones para la resiliencia de pinares mediterráneos 258
Elisa PÉREZ MARTÍN, Javier MARTÍNEZ MORENO, David MORENO PÉREZ, Marina ORTIZ SANZ, Belén TURRIÓN NIEVES, Francisco LAFUENTE ÁLVAREZ, Carmen ROMERALO TAPIA, Marta PARDOS MINGUEZ , Rafael CALAMA SAINZ, Gabriel SANGÜESA-BARREDA

Integrando modelización climática y ecológica en la conservación de especies y hábitats prioritarios (d92/43/cee) euro-mediterráneos: dos estudios de caso 265
Giovanni-Breogán FERREIRO-LERA, Ángel PENAS, Sara DEL RÍO

Variability of Saharan dust composition and its mixing with industrial air pollution over the tropical North Atlantic 272
Gorka VILLENA-ARMAS, Fabio GIARDI, Jessica LÓPEZ-DARIAS, Silvia NAVA, Franco LUCARELLI, Khannet WADINGA FOMBA, Sandra FREIRE y Sergio RODRIGUEZ

Calentamiento dependiente de la altitud en el Pirineo: datos, análisis y resultados 278
Pere ESTEBAN VEA, Javier SIGRÓ RODRÍGUEZ , Marc PROHOM DURAN , Juan Ignacio LÓPEZ-MORENO, Jordi CATEURA SABRI ,Jordi CUNILLERA GRAÑÓ

Organic carbon in coastal sediments and blue carbon estimation at two sites in the Canary Islands: a preliminary approach 284
Jose R. SIERRA-SALCEDO , David GONZÁLEZ-SANTANA , J. Magdalena SANTANA-CASIANO , Melchor GONZÁLEZ-DÁVILA , Aridane G. GONZÁLEZ

A Data-driven Methodology for Urban-Rural Characterization using Heat Stress Indices 290
Carmen RODRÍGUEZ-RUMAYOR, Ana CASANUEVA, Yaiza QUINTANA, Javier DIEZ-SIERR, Joaquín BEDIA

Propuesta metodológica para la evaluación del efecto de las Zonas de Bajas Emisiones (ZBE) sobre la salud de la población periférica vulnerable 295
Miguel Ángel PADILLA MARCOS, Lida MERCADO MARTÍN, Iván GARCÍA COBO

Evaluación del riesgo biometeorológico en España por situaciones de hipoxia e hiperoxia atmosférica 303
Benjamín ARROQUIA-CUADROS, Ricardo ALMENDRA, Angel MARQUÉS-MATEU , Laura SEBASTIÁ , Pablo FERNÁNDEZ-ARROYABE

Plan de adaptación al cambio climático de Santander: un recurso para la reducción de las desigualdades urbanas 309
Laura ASENSIO MARTÍNEZ, Lourdes GALINDO DELGADO, Francisco GARCÍA SÁNCHEZ, Cecilia RIBALAYGUA BATALLA

Indicadores bioclimáticos de las olas de calor 2023-2024 en seis zonas climáticas locales de la ciudad de Xalapa (México) 316
Adalberto TEJEDA-MARTÍNEZ, Aranza E. BARUCH-VERA, Irving R. MÉNDEZ-PÉREZ

Patrones de precipitación y temperatura en Xalapa, Veracruz (México), ciudad con un crecimiento urbano acelerado. 325
Carlos Manuel WELSH-RODRIGUEZ, Katia FERNANDEZ-GONZALEZ, Sarhay VAZQUEZ-MELENDEZ y Carolina Andrea OCHOA-MARTINEZ

El cierre de centrales térmicas de carbón: impacto sobre la calidad del aire en la montaña cantábrica 334
Domingo Fernando RASILLA ÁLVAREZ , Francisco CONDE ORIA y Miguel TORIBIO PÉREZ

Intensidad y variabilidad espacial de la Isla de Calor Urbana durante la segunda ola de calor del verano de 2025 en un entorno urbano vulnerable 340
Lida MERCADO-MARTÍN, Miguel Ángel PADILLA-MARCOS

Laboratorio de Calidad del Aire de Canarias: a scientific infrastructure linking to the atmosphere, public health, ecosystems and climate 347
Diana MESA-MORILLO, Jessica LÓPEZ-DARIAS, Nataly LÓPEZ-FERNÁNDEZ, Gorka VILLENA-ARMAS , Ibtissen BELBACHIR, Borja PÉREZ , Güize ALVAREZ, Eva DELGADO-DELGADO, Jon VILCHES, Fernando HERRERA, Sergio RODRÍGUEZ

Principales líneas de acción climática en la planificación turística a escala local 354
María Belén GÓMEZ MARTÍN, Xosé Antón ARMESTO LÓPEZ, Martí CORS IGLESIAS, Emilio MARTÍNEZ IBARRA

La influencia de la precipitación en la movilidad ciclista urbana: implicaciones para la gestión adaptativa a partir del caso de Barcelona 361
Antoni CARNEROS ESCUDERO

Vulnerabilidad socioeconómica ante el cambio climático a nivel municipal: La necesidad de un cambio en los estilos de desarrollo. El caso de San Cristóbal de La Laguna 366
Alejandro Samuel HERRERA HERNÁNDEZ, Francisco José DE ARMAS CASTELLANO, Emilio BONAL PÉREZ, Juan Israel GARCÍA CRUZ y Serafín CORRAL QUINTANA

Factores sociodemográficos en la percepción y comprensión de los avisos meteorológicos y la activación de los planes de emergencia en las islas Canarias (España) 376
Fernando MEDINA MORALES, Alessandro INDELICATO, Pablo MÁYER SUÁREZ, Lorenzo QUESADA RUIZ

Enseñar el cambio climático: percepciones y estrategias de los futuros docentes de educación primaria en Canarias 382
Juan Samuel GARCÍA-HERNÁNDEZ, María Yazmina LOZANO MAS, María Inmaculada FERNÁNDEZ-ESTEBAN, Abel LÓPEZ-DÍEZ

Patrones de comportamiento estatal en gobernanza climática internacional y su afectación a la biodiversidad: un acercamiento desde la comunicación política, la educación ambiental y la geopolítica 389
Aarón CHAVES CARRILLO, María CAMPOS ZUÑIGA

Metodologías activas para la enseñanza de la sostenibilidad y el cambio climático en la formación inicial del profesorado de educación primaria 400
Abel LÓPEZ-DÍEZ, Nerea MARTÍN-RAYA y Jordan CORREA

Incertidumbre en la respuesta del Atlántico norte a la mitigación de aerosoles, ozono troposférico y sus precursores 407
Alba SANTOS-ESPESO, Pablo ORTEGA, María GONÇALVES AGEITOS, Jon ROBSON

Projected evolution of sardine and sardinella populations in the Canary Current system over the 21st century 413
Irene NADAL, Jorge LÓPEZ-PARAGES, José C. SÁNCHEZ-GARRIDO

Identificación de sectores socialmente vulnerables ante eventos de inundación a partir del análisis de la prensa local en Santa Cruz de Tenerife 419
Yeray HERNDÁNDEZ-GONZÁLEZ, María JIMÉNEZ MEJÍAS, Nerea MARTÍN-RAYA, Jaime DÍAZ-PACHECO, Pedro DORTA ANTEQUERA y Abel LÓPEZ-DÍEZ

Uncovering cultures of resilience to inform future 425
Carla GOMES and Abel LÓPEZ-DÍEZ

Drought future projections in the Macaronesian archipelagos 432
J. CARRILLO, J. BARRANCOS, S. JEREZ, I. DARIAS, J. RODRÍGUEZ-RULI, A. J. GONZÁLEZ, J. C. PÉREZ, F. J. EXPÓSITO and J. P. DÍAZ

Vulnerability to climate change in the Canary Islands coastal area: a multidimensional analysis from a governance perspective. 438
Lorena NARANJO-ALMEIDA, Aridane GONZÁLEZ-GONZÁLEZ, Katherine SALÈS, Leví GARCÍA-ROMERO, Carolina PEÑA-ALONSO y Néstor MARRERO-RODRÍGUEZ

Soluciones basadas en la naturaleza para la mitigación de los efectos del cambio climático en la Macaronesia 443
Megan EXPÓSITO BRAZIER, Jelena KORITNIK, Noelia CRUZ PÉREZ , Alejandro GARCÍA GIL, Juan C. SANTAMARTA

Las piscinas oceánicas: Elementos de adaptación costera multifuncionales en un contexto de cambio climático 449
Nareme HERRERA LÓPEZ, Francisco GARCÍA SÁNCHEZ, Cecilia RIBALAYGUA BATALLA

Agua subterránea, cambio climático y soluciones de ingeniería innovadoras en una isla volcánica: el caso de La Palma en los proyectos bio-just y genesis 456
José Antonio BATISTA-MEDINA, Iván HERNÁNDEZ-RÍOS, Noelia GARCÍA-RODRÍGUEZ

Social vulnerability to urban flooding in Santa Cruz de Tenerife: a multi-scale, multivariate approach 462
María JIMÉNEZ-MEJÍAS, Abel LÓPEZ-DÍEZ, Jaime DÍAZ-PACHECO, Yeray HERNÁNDEZ-GONZÁLEZ, Nerea MARTÍN-RAYA, Pedro DORTA ANTEQUERA, Tamara FEBLES ARÉVALO and Jordan CORREA

Comité organizador

Pedro Dorta Antequera, Universidad de La Laguna
Abel López Díez, Universidad de La Laguna
Jaime Díaz Pacheco, Universidad de La Laguna
Jordan Correa González, Universidad de La Laguna
Nerea Martín Raya, Universidad de La Laguna
Alberto Martí Ezpeleta, Universidade de Santiago de Compostela
Dominic Royé, MBG-CSIC
Roberto Serrano Notivoli, Universidad de Zaragoza
Nieves Lorenzo González, Universidade de Vigo
Melisa Menéndez García, Universidad de Cantabria
Sabela Regueiro Sanfiz, Tragsatec-AEMET

Comité científico

Pablo Máyer Suárez, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria
Diamantino Henriques, Instituto Português do Mar e da Atmosfera
Juan Pedro Díaz González, Universidad de La Laguna
Pablo Fernández de Arróyabe Hernáez, Universidad de Cantabria
Judit Carrillo Pérez, Universidad de La Laguna
Miguel Ángel Saz Sánchez, Universidad de Zaragoza
María José Estrela Navarro, Universidad de Valencia
Emma Carmelo Pascual, Universidad de La Laguna
Víctor Bello Rodríguez, Universidad de La Laguna
Margarita Jambrina Enríquez, Universidad de La Laguna
Domingo Rasilla Álvarez, Universidad de Cantabria
Mónica Aguilar Alba, Universidad de Sevilla
Fidel González Rouco, IGEO-CSIC
David Suárez Molina, AEMET
Aridane González González, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria
Javier Martín Vide, Universitat de Barcelona
César Azorín Molina, CIDE, CSIC-UV-GVA
José Antonio Guijarro, AEMET
Antonio Manuel Saravia Lopes, Universidade de Lisboa
Yolanda Luna Rico, AEMET
Fernando Sánchez Rodrigo, Universidad de Almería
María Hernández Hernández, Universidad de Alicante

Pablo Sarricolea Espinoza, Universidad de Chile
Álvaro Castilla Beltrán, Universidad de La Laguna
Belén Gómez Martín, Universitat de Barcelona
Juan Pedro Montávez Gómez, Universidad de Murcia
Philip Ward, Vrije Universiteit Amsterdam
Oliver Meseguer Ruiz, Universidad de Tarapacá
Paula Remoaldo, Universidade do Minho
Sorin Cheval, Meteo Romania
José María Fernández-Palacios, Universidad de La Laguna
Jorge Olcina Cantos, Universidad de Alicante
Juan Jesús González Alemán, AEMET
Raúl Hernández Martín, Universidad de La Laguna
Carolina Peña Alonso, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria
Ana Monteiro, Universidade do Porto
Andrés Merino Suances, Universidad de León
Silvia Alonso Pérez, Universidad de La Laguna
Ana Moreno Caballud, IPE-CSIC
Jesús Asín Lafuente, Universidad de Zaragoza
Manuel Ruiz Villareal, IEO-CISC
Enrique Montón Chiva, Universitat Jaume I

Presentación

El XIV Congreso de la Asociación Española de Climatología, cuyas aportaciones recoge esta publicación, da continuidad a los encuentros bienales iniciados en Barcelona en 1999, y supone un hito más en el avance de la ciencia del Clima en los últimos lustros. Desde su fundación en 1997, la Asociación Española de Climatología ha aunado esfuerzos de los científicos para analizar y comprender el clima y su variabilidad, así como para fomentar el intercambio de conocimiento e ideas. A lo largo de estos 29 años ha impulsado y difundido numerosas actividades científicas de carácter interdisciplinar sobre todos los aspectos de la Climatología, contribuyendo a resolver los múltiples retos que plantea la sociedad actual en relación con el clima. Catorce congresos bienales y sus respectivas publicaciones, cursos de formación, jornadas de divulgación y múltiples conferencias, han contribuido a incrementar el conocimiento de los procesos atmosféricos y sus repercusiones en campos como la salud, las actividades económicas o el medio ambiente entre otros.

En un mundo más cálido, consecuencia del calentamiento global de carácter antropogénico, estamos batiendo año tras año records de temperaturas, y estamos comprobando como los eventos atmosféricos extremos están siendo, y van a ser, más frecuentes y severos. Es por ello necesario mejorar los sistemas de prevención y alerta. Y al mismo tiempo debemos adaptarnos, a corto y medio plazo, a los cambios que se están produciendo en el clima para reducir la exposición y la vulnerabilidad de las personas, bienes e infraestructuras.

Para conseguir esto es fundamental seguir avanzando en un mejor conocimiento del funcionamiento del sistema climático, así como en conseguir una eficaz y rigurosa comunicación de los resultados a la sociedad, desde la población en su conjunto, hasta los organismos encargados de tomar las decisiones adecuadas para conseguir una eficiente adaptación, para que tomen conciencia de las consecuencias, cada vez más evidentes, de un cambio climático global.

El XIV Congreso Internacional de la AEC, que se celebra en San Cristóbal de La Laguna (Tenerife), tiene como lema *Cambio climático, riesgos y territorio: avances y respuestas científicas*, y constituye una nueva contribución y un importantísimo avance en el conocimiento de las ciencias del clima en España y en otros países de Europa y América. Los organizadores del congreso, Pedro Dorta, Abel López, Jaime Díaz, Jordan Correa y Nerea Martín, gracias a su enorme esfuerzo y entusiasmo, han

conseguido reunir en este evento la segunda mayor participación de investigadores desde aquel primer congreso de Barcelona.

Desde el comienzo su objetivo fue reunir la mayor cantidad y diversidad posibles de profesionales de las ciencias del clima que pudieran aportar al debate y difundir los avances más recientes en un periodo crucial para la humanidad. Para ello abrieron para el debate 10 ejes temáticos, desde las proyecciones climáticas, los riesgos climáticos y la adaptación, los mecanismos de variabilidad atmosférica y oceánicas, hasta las repercusiones del clima en los ecosistemas, el turismo, las ciudades, la salud y el bienestar de la población, o sobre la gobernanza y comunicación climáticas, o las repercusiones del cambio climático en los espacios insulares y costeros. Los 300 trabajos presentados al congreso constituyen un rotundo éxito de los organizadores, a los que en nombre de la Junta Directiva y de todos los socios de la AEC, quisiera agradecerles y felicitarles por su trabajo y dedicación en la organización del congreso durante los dos últimos años. Extiendo este agradecimiento también a todos los organismos e instituciones que han brindado su apoyo y patrocinado este encuentro: Universidad de La Laguna, AEMET, Gobierno de Canarias, Cabildo Insular de Tenerife, Ayuntamiento de La Laguna, Binter Canarias, FIC y los proyectos MICROCLIMAC y PLANCLIMAC.

Sin duda que los trabajos presentados en este congreso van a contribuir a mejorar la prevención y la gestión de los riesgos climáticos, así como a minimizar la vulnerabilidad de la sociedad y de los territorios ante los evidentes y negativos efectos del cambio climático.

Alberto Martí Ezpeleta
Presidente de la Asociación Española de Climatología (AEC)

VARIABILIDAD Y TENDENCIAS DE AGUA PRECIPITABLE Y TEMPERATURA EN ALTURA SOBRE LA PENÍNSULA IBÉRICA A PARTIR DE RADIOSONDEOS (1973–2025)

María José CORDOBILLA CASCALES[1],
Adalberto TEJEDA MARTÍNEZ[2]

[1]*Universitat de Barcelona*
[2] *Universidad Veracruzana*

mj.cordobilla@ub.edu; atejeda.martinez@gmail.com

RESUMEN

Este estudio analiza la variabilidad espacio-temporal del vapor de agua en columna (agua precipitable, PW) y de la temperatura en altura (T500; 500 hPa) sobre la Península Ibérica para identificar patrones estacionales, gradientes espaciales y tendencias multidecadales. La metodología se basa en radiosondeos y metadatos de IGRA v2. Se seleccionaron estaciones con registros consistentes y un periodo común 1973–2025. A partir de perfiles diarios en niveles de presión obligatorios se calculó PW mediante integración vertical de la razón de mezcla y se extrajo T500. El preprocesado incluyó control de calidad y comprobaciones de consistencia inter-estación. Se obtuvieron climatologías mensuales y estacionales con observaciones 00Z/12Z y tendencias mediante Mann–Kendall y pendiente de Sen. Los resultados muestran un ciclo anual marcado, con máximos de PW en verano y mínimos en invierno. PW es mayor en estaciones de influencia marítima y menor en el interior y en áreas elevadas, mientras que T500 presenta un gradiente latitudinal con valores más altos hacia el sur. Las tendencias no son uniformes; en Lisboa se detecta un incremento significativo de PW (Sen ≈ +0,69 mm/década; p≈0,018). Además, el acoplamiento PW–T500 es significativo en A Coruña, Santander y Madrid (r≈0,45–0,55; p<0,001), pero no en Lisboa (r≈0,02; p≈0,749), lo que indica heterogeneidad regional. Estos resultados aportan una base observacional homogénea para estudiar la estructura atmosférica y su relación con estabilidad, convección y riesgos climáticos en la Península Ibérica.

Palabras clave: radiosondeos, IGRA v2, agua precipitable, temperatura a 500 hPa, Península Ibérica.

ABSTRACT

This study analyses the spatiotemporal variability of column water vapor (precipitable water, PW) and upper-air temperature (T500; 500 hPa) over the Iberian Peninsula to identify seasonal patterns, spatial gradients, and multidecadal trends. The methodology is based on radiosonde observations and IGRA v2 metadata. Stations with consistent records were selected, establishing a common period of 1973–2025. PW was computed from daily profiles at mandatory pressure levels through vertical integration of the mixing ratio, and T500 was extracted at 500 hPa. Preprocessing included quality control and inter-station consistency checks. Monthly and seasonal climatologies were derived from 00Z/12Z observations, and trends were assessed using the Mann–Kendall test and Sen's slope. Results show a pronounced annual cycle, with PW maxima in summer and minima in winter. PW is higher at stations under maritime influence and lower inland and at higher elevations, while T500 exhibits a latitudinal gradient with higher values toward the south. Trends are not uniform; in Lisbon, a significant increase in PW is detected (Sen ≈ +0.69 mm per decade; p≈0.018). In addition, PW–T500 coupling is significant in A Coruña, Santander, and Madrid (r≈0.45–0.55; p<0.001), but not in Lisbon (r≈0.02; p≈0.749), indicating regional heterogeneity. These results provide a homogeneous observational basis to study atmospheric structure and its links to stability, convection, and climate risks over the Iberian Peninsula.

Key words: radiosondes, IGRA v2, precipitable water (PW), 500 hPa temperature, Iberian Peninsula.

INTRODUCCIÓN

El vapor de agua es uno de los componentes más relevantes del sistema climático, ya que desempeña un papel fundamental en el balance energético, los procesos de convección y la formación de precipitación. Aunque representa solo una pequeña fracción de la masa atmosférica, constituye el principal gas de efecto invernadero natural, cuya variabilidad está estrechamente vinculada a la temperatura del aire (Soden et al., 2002; Tejeda-Martínez et al., 2018).

En este sentido, la relación termodinámica descrita por Clausius-Clapeyron establece que la capacidad de la atmósfera para contener vapor de agua aumenta aproximadamente un 7 % por cada grado de calentamiento, lo que implica posibles retroalimentaciones positivas en el sistema climático (Hartmann, 2016; IPCC, 2021; Tejeda-Martínez & Garduño-López, 2023).

El análisis del vapor de agua mediante el parámetro de agua precipitable (PW) resulta especialmente útil para comprender la distribución vertical de la humedad y su relación con la estructura térmica de la troposfera. Estudios basados en radiosondeos han permitido identificar patrones espaciales y temporales en diferentes regiones del mundo, evidenciando la importancia de la proximidad al mar y la altitud en la distribución del vapor de agua (Tuller, 1968; Castro-Díaz et al., 2022).

En la Península Ibérica, la interacción entre influencias atlánticas, mediterráneas y continentales genera una notable diversidad climática, lo que la convierte en un área de especial interés para el estudio de la estructura atmosférica. Sin embargo, los análisis basados en observaciones directas en altura siguen siendo menos frecuentes que los sustentados en datos de superficie o productos de reanálisis.

En este contexto, el objetivo de este trabajo es analizar la variabilidad espacio-temporal del agua precipitable y de la temperatura a 500 hPa sobre la Península Ibérica, así como identificar sus patrones estacionales, gradientes espaciales y tendencias durante el periodo 1973–2025.

METODOLOGÍA

Global Radiosonde Archive (IGRA v2), una de las principales colecciones de observaciones atmosféricas en altura, que integra múltiples fuentes y aplica control de calidad sobre variables como temperatura, humedad y viento (Durre et al., 2006; Durre et al., 2018). Se seleccionaron estaciones peninsulares con registros extensos y consistentes, estableciendo un periodo común de análisis entre 1973 y 2025. Las estaciones utilizadas fueron A Coruña, Santander, Madrid/Barajas y Lisboa, con continuidad temporal adecuada para el estudio de la variabilidad climática multidecadal.

Los datos analizados corresponden a radiosondeos realizados a las 00 y 12 UTC. A partir de los perfiles verticales en niveles de presión obligatorios, se calculó el agua precipitable (PW) mediante la integración vertical de la razón de mezcla, un método ampliamente utilizado en estudios de humedad atmosférica (Stull, 2011; Tejeda-Martínez et al., 2018), mientras que la temperatura a 500 hPa se extrajo directamente de los niveles correspondientes.

Estación	Latitud (°)	Longitud (°)	Altitud (m)	N meses válidos (PW & T500) *
A Coruña	43,3658	−8,4214	58,0	316
Santander	43,4911	−3,8006	52,0	153
Madrid/Barajas	40,4667	−3,5556	609,0	319
Lisboa	38,7892	−9,1352	103,0	262

*Tabla 1: Estaciones de radiosondeo analizadas (IGRA v2, 00/12Z, 1973–2025). Fuente: Datos IGRA v2. Elaboración propia. (*N corresponde al número de meses retenidos tras el control de calidad con valores válidos simultáneos de PW y T500.)*

El preprocesado incluyó el control de calidad proporcionado por IGRA, que identifica inconsistencias y valores anómalos en las observaciones (Durre et al., 2006), junto con una revisión adicional para asegurar la coherencia temporal entre estaciones. Posteriormente, se calcularon climatologías mensuales y estacionales para reducir la variabilidad diaria y facilitar la interpretación de los patrones climáticos. Las tendencias se estimaron mediante métodos no paramétricos, empleando la prueba de Mann-Kendall para detectar tendencias monotónicas y la pendiente de Sen, con un nivel de confianza del 95 %, siguiendo procedimientos habituales en estudios climáticos basados en radiosondeos (Castro-Díaz et al., 2022).

RESULTADOS

Los resultados muestran que el agua precipitable (PW) presenta un patrón espacial condicionado por la proximidad al océano y la altitud: los valores más elevados se registran en estaciones de influencia marítima, mientras que los más bajos se observan en el interior peninsular y en zonas de mayor altitud.

Desde el punto de vista temporal, se identifica un ciclo anual bien definido del PW, con máximos durante los meses estivales y mínimos en invierno, en coherencia con la relación entre temperatura y contenido de vapor de agua. La temperatura a 500 hPa (T500) presenta un gradiente latitudinal, con valores más elevados hacia el sur peninsular. Asimismo, esta variable muestra una variabilidad estacional clara, con máximos en verano y mínimos en invierno. Para complementar la descripción espacial y temporal anterior, la Tabla 2 presenta una síntesis de la tendencia de PW y de la correlación PW–T500 en las estaciones analizadas.

Estación	Sen PW (mm/década)	MK p	r (PW-T500)	p
A Coruña	+0,086	0,792	0,464	<0,001
Santander	−0,069	0,943	0,447	<0,001
Madrid/Barajas	−0,284	0,325	0,552	<0,001
Lisboa	+0,692	0,018	0,020	0,749

Tabla 2: Tendencia de PW y correlación PW–T500 en las estaciones analizadas (00/12Z, 1973–2025). Sen PW: pendiente de Sen (mm/década); MK p: valor p de Mann–Kendall; r: correlación de Pearson. Fuente: elaboración propia.

En términos estadísticos, la señal de tendencia no es uniforme entre estaciones: Lisboa es la única estación que presenta un incremento significativo de PW, mientras que en el resto las tendencias son débiles o no significativas. Asimismo, la relación de PW-T500 es significativa en A Coruña, Santander y Madrid, pero no en Lisboa, lo que evidencia contrastes regionales en el acoplamiento humedad-temperatura en altura.

DISCUSIÓN

Los patrones observados son coherentes con estudios previos que relacionan el contenido de vapor de agua con la disponibilidad de humedad y las condiciones térmicas (Tuller, 1968; Castro-Díaz et al., 2022). En la Península Ibérica, la influencia de los océanos Atlántico y Mediterráneo favorece mayores valores de humedad en zonas costeras, mientras que la continentalidad y la altitud contribuyen a reducirlos en el interior.

Las tendencias identificadas no son uniformes entre estaciones. En particular, el incremento de PW en Lisboa es compatible con el marco termodinámico de Clausius-Clapeyron, mientras que la relación PW–T500 muestra contrastes regionales, lo que sugiere que la respuesta conjunta de ambas variables depende de factores locales y de la diversidad climática peninsular.

Este comportamiento puede tener implicaciones relevantes sobre la estabilidad atmosférica y la convección, y por tanto sobre la intensidad potencial de episodios de precipitación intensa, tal como se ha observado en otros estudios a escala regional y global (Wang et al., 2017). Todo ello se enmarca en la relación termodinámica entre temperatura y contenido de vapor de agua y en los procesos de retroalimentación asociados al cambio climático (Tejeda-Martínez & Garduño-López, 2023).

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos permiten establecer las siguientes conclusiones:

- El agua precipitable presenta una distribución espacial condicionada por la influencia marítima y la altitud, junto con un ciclo anual bien definido.
- La temperatura a 500 hPa muestra un gradiente latitudinal con valores más elevados hacia el sur, y una variabilidad estacional marcada.
- Las tendencias no son uniformes entre estaciones; en particular, PW muestra un incremento significativo en Lisboa.
- Estos cambios son compatibles con el calentamiento regional y pueden influir en la estabilidad atmosférica y los riesgos climáticos.

En conjunto, la relación PW–T500 presenta heterogeneidad regional, lo que refuerza la utilidad de PW como indicador de disponibilidad de humedad y su posible papel en escenarios de riesgo por precipitación intensa, especialmente en regiones costeras.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a IGRA v2 y a las instituciones que preservan los radiosondeos utilizados en este estudio, así como el apoyo de la Universitat de Barcelona, la Universidad Veracruzana y la Asociación Española de Climatología (AEC).

REFERENCIAS

Castro-Díaz, J. O., Baruch-Vera, A., & Tejeda-Martínez, A. (2022). Variaciones temporales de la humedad atmosférica en altura sobre México. En *Retos del cambio climático: impacto, mitigación y adaptación*. Asociación Española de Climatología.

Durre, I., Vose, R. S., & Wuertz, D. B. (2006). Overview of the Integrated Global Radiosonde Archive. *Journal of Climate*, *19*(1), 53–68.

Durre, I., Yin, X., Vose, R. S., et al. (2018). *Integrated Global Radiosonde Archive: Version 2*. NOAA National Centers for Environmental Information.

Hartmann, D. L. (2016). *Global Physical Climatology* (2nd ed.). Academic Press.
IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press.

REFERENCIAS

Soden, B. J., Wetherald, R. T., Stenchikov, G. L., & Robock, A. (2002). Global cooling after the eruption of Mount Pinatubo: A test of climate feedback by water vapor. *Science*, *296*, 727–730.

Stull, R. (2011). *Meteorology for Scientists and Engineers* (3rd ed.). University of British Columbia.

Tejeda-Martínez, A., Méndez-Pérez, I. R., Rodríguez, N. C., & Tejeda-Zacarías, E. (2018). *La humedad en la atmósfera: bases físicas, instrumentos y aplicaciones*. Universidad de Colima. http://www.ucol.mx/content/publicacionesenlinea/adjuntos/La-humedad-en-la-atmosfera_466.pdf

Tejeda-Martínez, A., & Garduño-López, R. (2023). *La humedad atmosférica y los cambios climáticos antropogénicos: una revisión*. Puerta Abierta Editores.

Tuller, S. E. (1968). World distribution of mean monthly and annual precipitable water. *Monthly Weather Review*, *96*, 785–797.

Wang, R., Fu, Y., Xian, T., et al. (2017). Evaluation of atmospheric precipitable water characteristics and trends in mainland China. *Journal of Climate*, *30*, 8673–8688.

PROJECTIONS OF TOTAL CLOUD COVER IN THE CANARY ISLANDS DURING THE 21st CENTURY USING DYNAMIC DOWNSCALING AND SATELLITE DATA

Paula SOSA GUILLÉN[1], Rubén BARRAGÁN CUESTA[1], Judit CARRILLO PÉREZ[1], Juan Pedro DÍAZ GONZÁLEZ[1], Albano GONZÁLEZ FERNÁNDEZ[1], Juan Carlos PÉREZ DARIAS[1], Francisco Javier EXPÓSITO GONZÁLEZ[1]

[1]Grupo de Observación de la Tierra y de la Atmósfera (GOTA), Universidad de La Laguna, Av. Astrofísico Francisco Sánchez, s/n, La Laguna, 38200, S.C. de Tenerife, España.

paula.sosa.guillen.09@ull.edu.es

RESUMEN

La cobertura nubosa modula el balance térmico e hidrológico de las Islas Canarias, pero sus proyecciones en la modelización climática regional siguen siendo un desafío importante. Para abordar esta cuestión, se analiza la cobertura nubosa total (TCC, por sus siglas en inglés) utilizando simulaciones de alta resolución (3 km) del modelo *Weather Research and Forecasting* (WRF) para mediados (2030–2059) y finales de siglo (2070–2099) bajo los escenarios SSP1-2.6 y SSP5-8.5. Para garantizar la consistencia observacional, se aplicó una corrección de sesgo a las salidas del modelo frente al conjunto de datos satelitales de EUMETSAT empleando el método *Scaled Distribution Mapping* (SDM). Los resultados revelan una tendencia general a la disminución de la TCC sobre las islas (particularmente pronunciada bajo escenarios de altas emisiones), en contraste con los incrementos proyectados sobre el océano abierto

ABSTRACT

Cloud cover modulates the thermal and hydrological balance of the Canary Islands, but its accurate simulation continues to be a major challenge in regional climate modeling. To address this, we analyzed total cloud cover (TCC) using high-resolution (3 km) Weather Research and Forecasting (WRF) simulations. Future conditions for the mid-century (2030–2059) and end-century (2070–2099) were projected using a Pseudo-Global Warming (PGW) framework forced by CMIP6 data under both SSP1-2.6 and SSP5-8.5 scenarios. To ensure observational consistency, model outputs were bias-corrected against the EUMETSAT satellite dataset using the Scaled Distribution Mapping (SDM) method. Results reveal a general decreasing trend in TCC over the islands (particularly pronounced under high-emission scenarios) contrasting with projected increases over the open ocean.

INTRODUCTION

Clouds act as the primary climate regulators for the Canary Islands by modulating the radiation balance and driving the hydrological cycle. High- and mid-level cloud formations provide frontal precipitation, while the persistent low-level stratocumulus layer serves as a radiative regulator (Wood, 2012). This low-level cloud cover, governed by the Azores High and trade-wind inversion, also provides a critical moisture source through direct interception by vegetation. However, accurately simulating these cloud regimes remains a significant challenge for both global and regional models. To overcome these limitations, a regional analysis is conducted following the methodology validated in previous climate projection research for the Canary Islands (see Expósito et al., 2015).

METHODS

2.1. Data

2.1.1. Observational Satellite Data: COMET EUMETSAT

Observational cloud fractional cover was sourced from the CM SAF COMET Edition 2 dataset (Stöckli et al., 2024). It provides a 38-year homogeneous time series (1983–2020) derived from Meteosat First and Second Generation (MFG and MSG) satellite sensor. To ensure inter-sensor consistency, the dataset utilizes EUMETSAT-calibrated radiances and an advanced Bayesian retrieval algorithm. The data, archived on a resolution of 0.05º grid, were subsetted for the Canary Islands region.

2.1.2. Model ConfigurationData: WRF-PGW (CMIP6)

The study employs the WRF-ARW (v3.9) model to conduct dynamical downscaling over the Canary Island archipelago, utilizing three nested domains reaching a high spatial resolution of 3km. To project future climate conditions, the research adopts the Pseudo-Global Warming (PGW) approach, which applies a mean climate perturbation signal derived from a 17-GCM ensemble (CMIP6) to high-quality ERA5 reanalysis data (see Rodríguez-Rull et al. (2026)). Future projections target two distinct temporal periods, mid-century (2030–2059) and end-century (2070–2099), under the contrasting SSP1-2.6 and SSP5-8.5 emission scenarios.

2.2. Bias Correction Method

To ensure observational consistency between the high-resolution WRF-PGW simulations and the satellite-derived benchmarks, a systematic bias correction was applied to the daily cloud fractional cover series. In this study, the Scaled Distribution

Mapping (SDM) method (formulated by Switanek et al. (2017)) was implemented using a Gamma distribution probability density function.

RESULTS

3.1. Projected Changes in Total Cloud Cover

To assess the future evolution of total cloud cover (TCC), relative changes were evaluated against the historical baseline, focusing on a seasonal analysis for the mid-century and end-century periods under the high-emission SSP5-8.5 scenario, see Figure 1. The high-resolution (3 km) WRF-PGW projections reveal a land-sea contrast in the regional cloud response.

Over the ocean, a persistent increase in TCC is observed in the northeastern sector across all seasons. During the spring and summer months, this cloud enhancement becomes significantly more pronounced, expanding spatially to encompass the northwestern maritime region. Conversely, during autumn and winter, the northwestern ocean exhibits a marked reduction in cloud cover. This pattern is likely driven by the mechanical influence of the archipelago's complex orography, where the islands' high relief acts as a physical barrier to incoming northeasterly flows.

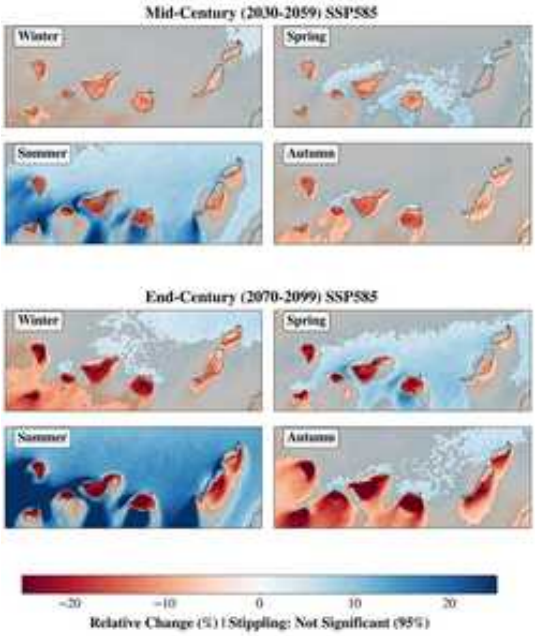


Figure 1. Seasonal relative change in total cloud cover across the Canary Islands under the SSP5-8.5 scenario. The maps illustrate the difference between the bias-corrected WRF-PGW simulations for the mid-century (top panels), and end-century (bottom panels) periods relative to the historical baseline (1983–2019). From left to right: winter, summer, spring and autumn. Stippling indicates areas where the projected changes are not statistically significant at the pixel level.

In contrast to the marine environment, the terrestrial areas of the Canary Islands exhibit a consistent differential behavior. The archipelago landmasses experience a decrease in TCC across all seasons and time horizons. This continuous degradation of island cloud cover peaks in severity by the end of the century, with the most acute reductions occurring during the summer and autumn seasons. These results suggest that under severe warming trajectories, the distinct thermodynamic and mechanical responses of the island topography may contribute to a pronounced decoupling of coastal and open-ocean cloud dynamics.

DISCUSSION y CONCLUSIONS

To investigate whether the projected land-sea contrast in cloud cover is already manifest in the historical record, we evaluated long-term observational trends using the CM SAF COMET Edition 2 dataset. This analysis confirms that the differential behavior of TCC trends between maritime and terrestrial environments is a pre-existing phenomenon in the region (as illustrates the transect across Tenerife in Figure 2). The alignment between these established historical trends and our high-resolution WRF-PGW simulations suggests that the model could capture the regional forcing mechanisms driving this distinct behavior.

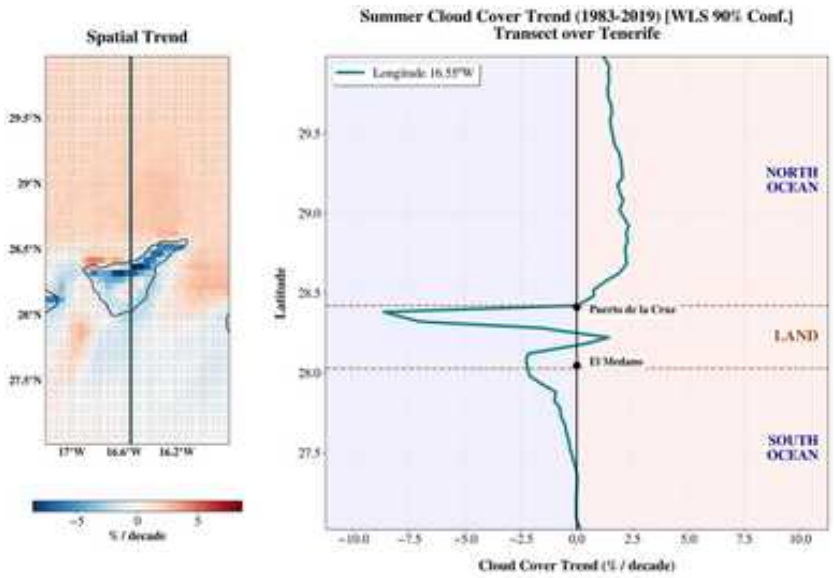


Figure 2. Observational analysis of total cloud cover trends over Tenerife based on the COMET (EUMETSAT) dataset. Left panel: Spatial distribution of TCC trends (percentage change per decade) across Tenerife for the 1983–2019 period. Right panel: Latitudinal transect along the 16.55º W meridian. The upper section of the transect corresponds to the northern ocean, while the central area, delimited by dashed lines, represents the landmass. The lower section corresponds to the southern ocean.

Nevertheless, the results presented here represent a preliminary stage of an ongoing investigation. Research is currently in progress to characterize the broader physical and synoptic context governing these trends. Understanding the underlying drivers requires a detailed evaluation of additional thermodynamic variables, including the lifting condensation level (LCL), specific humidity profiles, and sea surface temperatures (SST), among others. This ongoing analysis is essential to determine the exact role of atmospheric stability and moisture convergence in the projected decoupling of land and ocean cloud dynamics.

ACKNOWLEDGMENTS

This research utilized data from the WCRP Coupled Model Intercomparison Project (CMIP6). We acknowledge the observational data provided by EUMETSAT CM SAF. Numerical modeling was performed using the WRF-ARW model, and we thank NCAR and the WRF development community for this open-source tool. Computational resources were provided by the Teide-HPC (ITER), Canary Islands. Finally, we acknowledge the WCRP CORDEX FPS-I-Mac and the PLANCLIMAC2 Project (1/MAC/2/2.4/0006) for its support and focus on the Macaronesian region.

REFERENCES

Wood, R. (2012). Stratocumulus clouds. *Monthly Weather Review*, *140*(8), 2373–2423. https://doi.org/10.1175/mwr-d-11-00121.1

Expósito, F. J., González, A., Pérez, J. C., Díaz, J. P., & Taima, D. (2015). High-Resolution future projections of temperature and precipitation in the Canary Islands. *Journal of Climate*, *28*(19), 7846–7856. https://doi.org/10.1175/jcli-d-15-0030.1

Stöckli, R., Bourgeois, Q., Tetzlaff, A., Schröder, M., & Hollmann, R. (2024). CM SAF ClOud Fractional Cover dataset from METeosat First and Second Generation - Edition 2 (COMET Ed. 2) [Dataset]. In *EUMETSAT SAF on Climate Monitoring* https://doi.org/10.5676/eum_saf_cm/cfc_meteosat/v002

Rodríguez-Rull, J., Expósito, F. J., Díaz, J. P., Carrillo, J., Pérez, J. C., & Henriques, D. (2026). High-resolution regional climate projections and tourism impacts in the Macaronesian archipelagos. *Scientific Reports*, *16*(1). https://doi.org/10.1038/s41598-026-43092-9

Switanek, M. B., Troch, P. A., Castro, C. L., Leuprecht, A., Chang, H., Mukherjee, R., & Demaria, E. M. C. (2017). Scaled distribution mapping: a bias correction method that preserves raw climate model projected changes. *Hydrology And Earth System Sciences*, *21*(6), 2649-2666. https://doi.org/10.5194/hess-21-2649-2017

STOCHASTIC GENERATOR OF DAILY AND SUBDAILY PRECIPITATION THROUGH NESTED STOCHASTIC MODELS AND REANALYSIS DATA

Juan MARCEN-GUTIERREZ[1], Jesús ASÍN[1], Ignacio OJER GARCÍA[2], Sergio MARTÍNEZ-ARANDA[2], Jorge CASTILLO-MATEO[1], Ana C. CEBRIÁN[1]

[1]*Department of Statistical Methods and IUMA, University of Zaragoza, Spain*
[2]*Computational Hydraulics and Hemodynamics Group and I3A, University of Zaragoza, Spain.*

jmarcen@unizar.es

ABSTRACT

We describe the creation of a stochastic generator designed to produce synthetic hourly precipitation series at specific locations within a region. This generator is based on a hierarchical modeling framework that combines daily and subdaily precipitation components, both incorporating seasonality and temporal dependence. The methodology was tested in the Ebro basin (Aragon, Spain) area, utilizing field measurements from the SAIH-EBRO network and atmospheric information from ERA5 reanalysis. Performance of the generator is evaluated through simulations for 2014–2015. Results show good agreement between observed and simulated precipitation, as confirmed by Chi-square tests for the relative frequency of subdaily precipitation and Kolmogorov–Smirnov tests comparing simulated and observed quantiles. Occurrence models achieve robust AUC values at both daily and subdaily scales, while the quantity models show satisfactory reproduction of precipitation distributions, particularly for higher quantiles. These results make the generator a valuable tool for climate impact studies, particularly for assessing precipitation variability and extreme events under current and future climate conditions.

Keywords: Atmospheric covariates, Ebro basin, rainfall statistical model, subdaily precipitation simulation.

INTRODUCTION

This study aims to construct a stochastic generator capable of producing new hourly rainfall sequences at specific locations within a region, ensuring the simulations depend on atmospheric variables. This new procedure is capable of obtaining synthetic precipitation trajectories that reflect the atmospheric conditions, avoiding criticisms about the use of stationary generators to study the precipitation under climate change conditions (Abdelmoaty et al, 2026).

The core principle of the generator involves modeling daily precipitation based on the prevailing atmospheric situation, utilizing variables with climatic information regarding the current state of the atmosphere, such as different geopotential levels from reanalysis data. The generation of subdaily rainfall is accomplished through a set of nested models that incorporate both seasonality and temporal dependence.

The methodology is applied to a region within the Ebro Valley in Aragon, Spain. The used data consists of 15-minute rain series collected from 28 stations belonging to the SAIH-EBRO network, alongside atmospheric information provided by the ERA5 reanalysis. The time series, which span from May 2011 to November 2023, were preprocessed to create the necessary hourly and daily datasets. Figure 1 illustrates the spatial distribution of the stations and the location of the ERA5 covariates used.

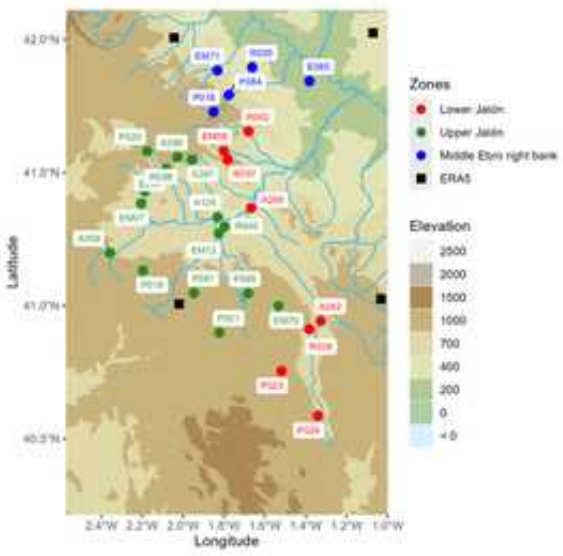


Figure 1: Stations with available 15 minute precipitation series distinguished by zones and location of the ERA5 reanalysis data

METHODS

The overall procedure for generating hourly precipitation is shown in Figure 2. The model framework utilizes two types of Generalized Linear Models (GLMs). Binary response GLMs are used for modeling precipitation occurrence, incorporating memory, seasonal variability (harmonic terms), and the provided atmospheric covariates. For the precipitation quantity, Gamma GLMs are employed. These Gamma models are structured so that the shape parameter, in addition to the mean (or central tendency), is allowed to be dependent on the available covariates. This distribution is commonly

applied when modeling precipitation intensity (Martinez-Villalobos & Neelin, 2019; Watterson & Dix, 2003). Moreover, nonlinear effects of the variables are typically incorporated into both sets of models.

The design requires modeling first at the daily scale and then transitioning to the hourly scale. Daily ERA5 reanalysis predictors are integrated with local observations using a downscaling method called Perfect Prognosis (PP) (Gutiérrez et al., 2019), which establishes a connection between large-scale atmospheric conditions and local rainfall data. Hourly models work as a stochastic distributor, they have daily accumulated precipitation and situation in the previous hours as inputs.

To build the generator, several steps and criteria must be satisfied. We carry out a model selection procedure for the nested components of the generator. The explanatory ability of each model was evaluated using metrics such as the Akaike Information Criterion (AIC) and the Area Under the Curve (AUC). An additional factor was the inclusion of covariates that displayed significant effects across all monitored stations in the study region. A final constraint for selecting the ultimate model—at both the daily and hourly scales—was its capacity to accurately replicate high precipitation quantiles.

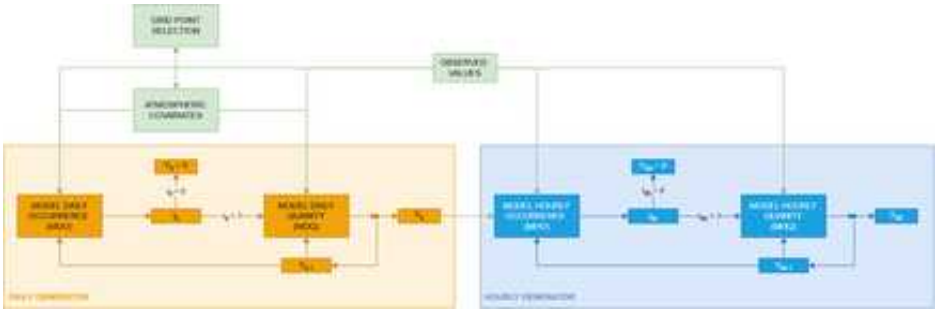


Figure 2: Workflow with components of the generator of subdaily precipitation

RESULTS

Results in the region around Ateca are summarized. Simulations are conducted for the 2014-2015 period at station A126. These simulations involved generating one daily sequence followed by 20 corresponding hourly sequences. Figure 3 shows the assessment of hourly precipitation, both in terms of occurrence and intensity. The left graph displays p-values from a Chi-square test comparing the observed and simulated relative frequencies of rainy hours. As shown, the results yielded by this test are satisfactory, with p-values exceeding 0.05. The right graph illustrates how hourly amounts are simulated: the boxplots represent the different simulated quantiles, plotted against the observed quantiles at the station (in red). To obtain a numerical measure, we compute the proportion of simulations exceeding the observed value for

each quantile, and repeat the process for each season to increase the sample size. A Kolmogorov–Smirnov test comparing these proportions against a Uniform distribution resulted in a p-value of 0.654, indicating good agreement.

A deeper assessment can be made by examining individual model performance in the entire region and full study period. AUC values for precipitation occurrence models were robust, ranging from 0.785 to 0.828 at the hourly scale, and from 0.802 to 0.851 at the daily scale. For the quantity models, a quantile-based test is considered to evaluate the similarity between simulated and observed distribution, in the hourly case, p-values range from 0.00005 to 0.34621 (46% above 0.05 and 64% above 0.01), and in the daily case from 0.012 to 0.871 (78% above 0.05).

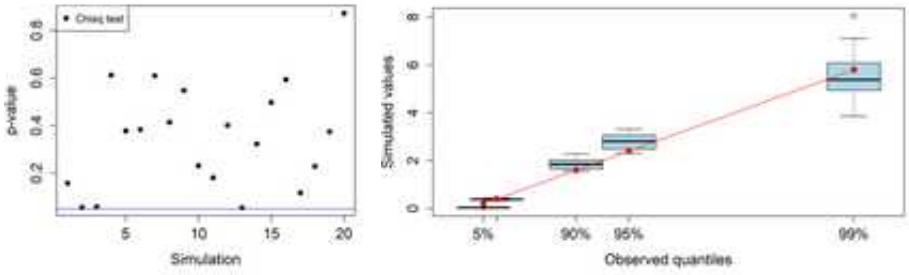


Figure 3: Left: p-values from a Chi-square test comparing the observed and simulated relative frequencies of hourly precipitation in the 2014-2015 period at station A126. Right: Comparison of quantiles of simulated and observed hourly precipitation distribution in the 2014-2015 period at station A126.

The ability of this simulator to simulate rainy spells is analysed, because they are the events that may carry the most relevant consequences in the region. Different types of extreme rainy spells are defined. In this example, we consider the accumulated rain over a 48-hour period on two strategically located stations, A126 and A287, generating one daily simulation for 2014 and 2015, each followed by 20 hourly simulations. Figure 4 shows the 48 hour rainy spell simulated with the most accumulated rain between both stations in a 48-hour period.

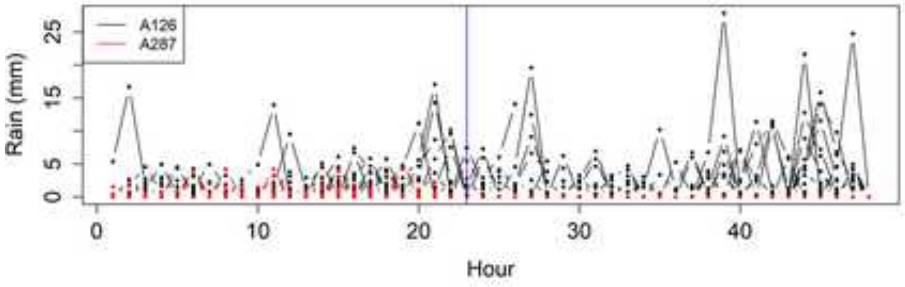


Figure 4: 48-hour rainy spell simulated with the highest accumulated rain (64.36 mm) accumulated in the A126 and A287 stations.

CONCLUSIONS

A new procedure has been developed to obtain an appropriate statistical model that is useful as a stochastic generator of subdaily rainfall at local scale. A phase with an extensive variable selection process is included to capture elements that have effect over the occurrence and quantity of precipitation. An additional careful control phase is implemented to verify that precipitation characteristics are accurately reproduced.

By incorporating atmospheric covariates, the models enhance physical interpretability, and represent the random behavior not explained by covariates. This allows it to simulate precipitation trajectories under both current and future climate scenarios, making it a valuable tool for assessing the impact of extreme precipitation events.

Applied in the Jalon river basin, the new procedure has demonstrated the ability to accurately reproduce daily and subdaily precipitation characteristics, both in terms of occurrence and quantity.

Future development will focus on creating a methodology capable of generating simultaneous precipitation episodes across all stations in a region, incorporating previous state related to the entire area of the region, and including interactions to modulate the effect of atmospheric covariates for every point on a grid of a desired resolution covering the study area.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors acknowledge the support of the projects PID2023-150234NB-I00, PID2024-155426OB-I00 and RED2024-153680-T Biostatnet, and Gobierno de Aragón under Grant PROY_T21_24 - HIDROGIF, and Research Group E46 23R: Modelos Estocásticos. J.M.-G. was supported by Gobierno de Aragón under Doctoral Scholarship ORDEN EMC/590/2025.

REFERENCES

Abdelmoaty, H. M., S. M. Papalexiou, A. Mamalakis, S. Singh, V. Coia, M. Hairabedian, P. Szeftel, and P. Grover, 2026: Does Non-Stationarity Affect GAN-Based Downscaling? Insights from High-Resolution WRF Simulations over the Canadian Prairies. *Artificial Intelligence for the Earth Systems*, e250093.

Gutiérrez, J. M., Maraun, D., Widmann, M., Huth, R., Hertig, E., Benestad, R., ... & Pagé, C. (2019). An intercomparison of a large ensemble of statistical downscaling methods over Europe: Results from the VALUE perfect predictor cross-validation experiment. *International Journal of Climatology*, 39(9), 3750-3785.

Martinez-Villalobos, C., & Neelin, J. D. (2019). Why do precipitation intensities tend to follow gamma distributions*? Journal of the Atmospheric Sciences*, 76(11), 3611-3631.

Watterson, I. G., & Dix, M. R. (2003). Simulated changes due to global warming in daily precipitation means and extremes and their interpretation using the gamma distribution. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D13).

ADDED VALUE OF REGIONAL CLIMATE CHANGE PROJECTIONS

Sixto HERRERA GARCÍA[1,5], Fernando GONZÁLEZ TABOADA[2,5], Ricardo ANADÓN ÁLVAREZ[3], Miguel Ángel ÁLVAREZ GARCÍA[4,5], Arturo COLINA VUELTA[4], Juan Carlos FERNÁNDEZ IGLESIAS[4], Carlos GUARDADO FERNÁNDEZ[3,5]

[1]Applied Mathematics and Computer Science Department, Universidad de Cantabria,
[2]Centro Oceanográfico de Gijón, IEO-CSIC,
[3]Dpto. de Biología de Organismos y Sistemas, Universidad de Oviedo
[4]Instituto de Recursos Naturales y Ordenación del Territorio-INDUROT, Universidad de Oviedo
[5]Estación Cátedra de Cambio Climático (CuCC), Universidad de Oviedo

sixto.herrera@unican.es

ABSTRACT

The National Plan of Climate Change periodically develops climate change projections at the national scale with a resolution of ~5-10 km. However, most regional applications require further refinement to meet the spatial resolution targeted by impact communities. The aim is to develop regional, high-resolution products that, on the one hand, properly capture the local variability of the typical climatic variables (mainly precipitation and temperatures) and, on the other hand, allows calibration of climate change projections given by other national and/or international initiatives to their own regional characteristics.

In this work, we consider both the calibrated scenarios developed at national scale in the framework of the National Plan of Climate Change and the corresponding projections calibrated at regional scale considering a high-resolution (1 km) dataset built for Asturias in the framework of the activities of the University of Oviedo Chair on Climate Change (CuCC) in order to compare and obtain the added value, if exists, given by the regional initiatives. Moreover, we introduce some possible approaches to coordinate both national and regional initiatives to ensure the coherence between both levels, exploit synergies, and maintain the added value given by the higher resolution regional datasets.

Key words: Climate change projections, regional variability, high-resolution, impact studies, added value.

INTRODUCTION

Regional climate adaptation requires high- and very-high-resolution climate information. To this aim, in Spain, both national initiatives (Hernanz et al. 2025, PNACC, National Plan of Climate Change Adaptation) and regional projects have produced climate projection using different approaches (Gutiérrez et al. 2010; ESCAT 2013; Expósito et al. 2015; NEIKER 2023; Allué and García-López, 2024; Taboada et al. 2025a and 2025b).

However, differences in the spatial resolution (1 km vs 5-12 km), the observational reference considered and the statistical methods used to produce these projections can lead to inconsistencies in projected results (Díez-Sierra et al., 2023; Ban et al., 2021; Fernández et al. 2019), increasing the uncertainty and reducing the confidence on them (Bedia et al. 2013; Fortini at al. 2023; Carril et al. 2023; Rodríguez-Rey and Jiménez-Valverde, 2024; Kang et al. 2025). This work compares national and regional projections for Asturias to assess their differences, evaluate their consistency and quantify the added value of regional approaches.



Figure 1. River basins defined by the CHC. Pink shadow reflects the extension considered in the CuCC. Source: Created by the authors for this contribution.

METHODS

The caracterization and impact analysis of climate change over a region requires of representative territorial unities and the consideration of significant variables and climatic indices. Two geographical partitions were defined by the CuCC team (Taboada et al. 2025a) but, for the sake of the clarity, in this work we only consider the ten river basins located in Asturias (Fig. 1) defined by the Cantabrian Hydrographic Confederation (Confederación Hidrográfica del Cantábrico - CHC, https://www.chcantabrico.es). It should be noted that there is not an universal optimum partition as (i) territories include several process operating at different scales and (ii) the spatial aggregation could change the results when the scale is modified, the known

Modifiable Areal Unit Problem (MAUP, Buzzelli 2019: Wong, 2004). This effect could modify correlations, trends and statistical significance of the results depending on the aggregation type considered (Fotheringham and Wong, 1991; Jelinski and Wu, 1996). For comparison purposes, we also have considered the results for the whole domain, named as Asturias in the figures.

Two ensembles based on Euro-CORDEX (Giorgi et al. 2009; Jacob et al. 2014, https://euro-cordex.net/) simulations for the scenarios histrical, rcp4.5 y rcp8.5 were analyzed. On te one hand, the national reference developed in the framework of the PNACC (Hernanz et al. 2025) considering the ISIMIP bias calibration method (Lange, 2019 and 2021) and the dataset ROCIO-IBEB (Peral et al. 2017) as observational reference, leading to a daily national dataset of 5 km spatial resolution. On the other hand, the regional dataset developed by the CuCC team (Taboada et al. 2025a and 2025b) considering the Empirical Quantile Mapping bias calibration method (Gutiérrez et al. 2019, Casanueva et al. 2020) and the high-resolution daily gridded dataset of precipitation built for Asturias and sourrounding regions (see the pink shadow in Fig. 1)

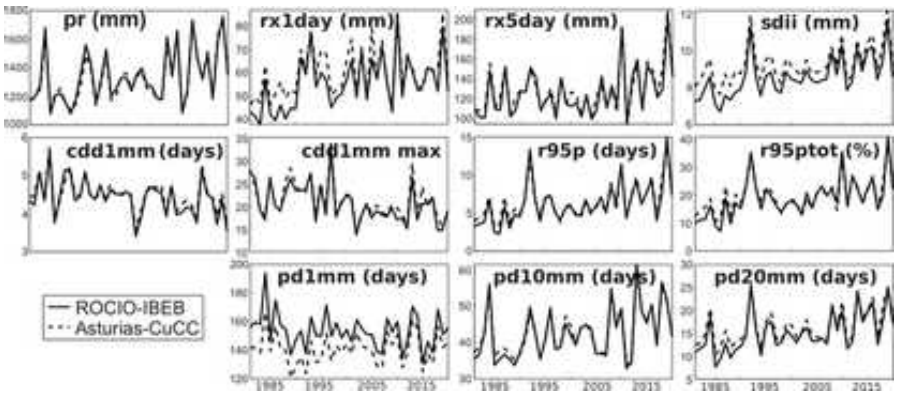


Figure 2. Precipitation indices considered. Source: Created by the authors.

Although the analysis considers the precipitation index shown in Fig. 2 (Taboada et al. 2025a), in the present work we focus on the number of wet days (pd1mm) and the maximum length of dry days (cdd1mm-max). Results are aggregated annualy and evaluated over Asturias abd its river basins.

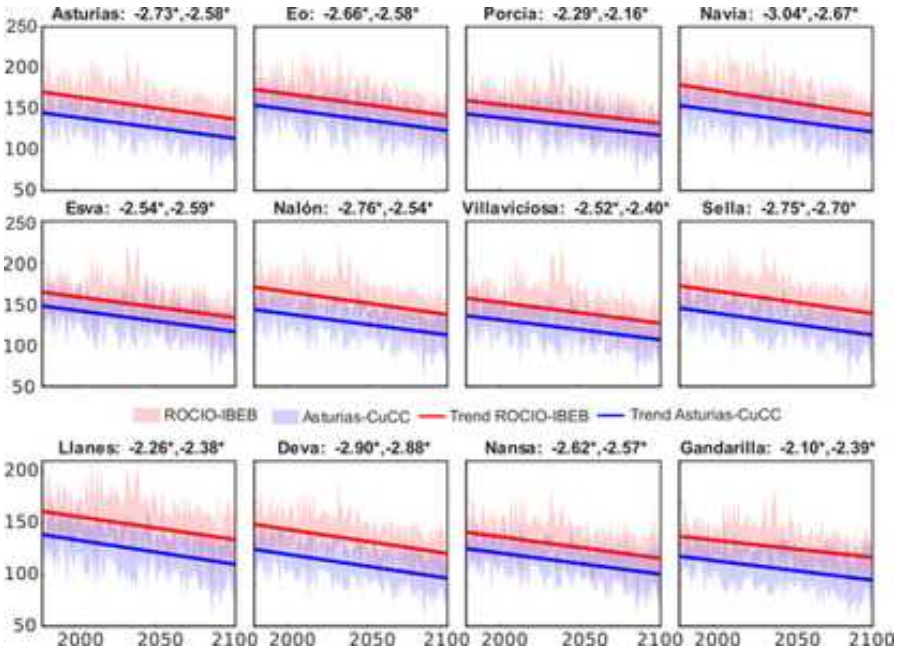


Figure 3. Projections and trend of pd1mm for the scenario rcp85 adjusted with ROCIO-IBED (red shadow and line) and Asturias-CuCC (blue shadow and line). Numbers in titles reflect the slope (days per decade) of the regression curves (red, blue) considering the whole period. Statistical significant values are highlighted with an asterisc (*). Source: Created by the authors.

RESULTS

Both, national and regional datasets, show similar mean precipitation patterns at regional scale (Fig. 2). However, the number of wet days (pd1mm) is higher in the national dataset. This difference propagates to other indices as SDII (simple daily intensity index). Also the maximum daily precipitation index (rx1day) is higher for the regional dataset than the national dataset. Both results could be expected due to the interpolation process and the spatial representivity of both datasets, 5 km² versus 1 km².

Differences in Fig. 2 propragate to differences in future projections of precipitation occurrence (pd1mm) as reflected in Fig. 3, but with consistent trends accross datasets. However, there are significant differences for the maximum length of consecutive dry days (Fig. 4) among datasets and with a great subregional variability, reaching, in some regions, a factor of two between datasets.

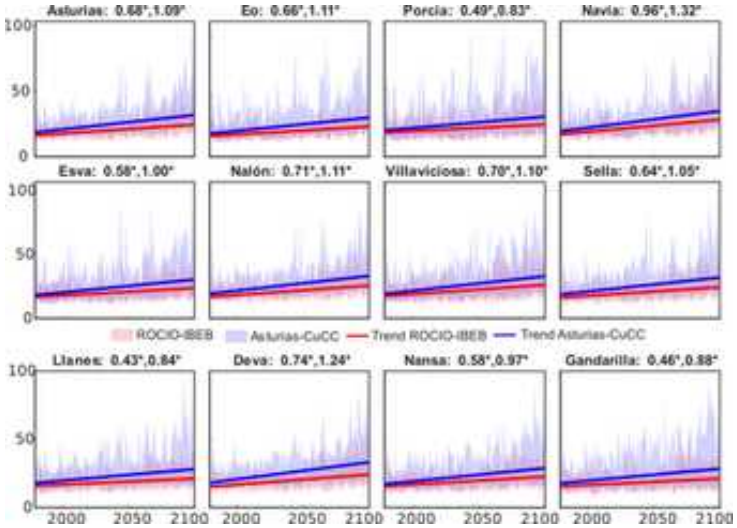


Figure 4. As Fig. 3 but for the annual maximum length of consecutive dry days (cdd1mm-max).
Source: Created by the authors for this contribution.

CONCLUSIONS y DISCUSSION

Regional and national projections show general agreement at autonomic level but can significantly differ in entreme indices and subregional variability. As a result, these discrepancies increase the uncertainty in climate change projections, affecting decision-making processes. In this sense, a coordinated framework, following the efforts done by AEMet and the Spanish Office for Climate Change (OECC) to coordinate the regional initiatives, combining national consistency and regional high-resolution detail, similar to the work of González-Abad et al. 2025, is necessary to improve reliability and usability of climate change projections.

ACKNOWLEDGMENTS

La elaboración de este trabajo ha contado con el apoyo de la Cátedra de Cambio Climático (CuCC) de la Universidad de Oviedo, financiada por el Principado de Asturias.

REFERENCESS

Allué Camacho C. and García López J.M., 2024, Los Bosques Naturales de Castilla y León: Caracterización y potencialidades fitoclimáticas en un contexto de cambio climático, ISBN: 978-84-128557-7-7

Ban, N., Caillaud, C., Coppola, E. et al., 2021, The first multi-model ensemble of regional climate simulations at kilometer-scale resolution, part I: evaluation of precipitation. *Clim Dyn 57*, 275–302. https://doi.org/10.1007/s00382-021-05708-w

Bedia, J., Herrera, S., Gutiérrez, J.M., 2013, Dangers of using global bioclimatic datasets for ecological niche modeling. Limitations for future climate projections, Global and Planetary Change, 107, 1-12, ISSN 0921-8181, https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2013.04.005.

Carril, A. F., Flombaum, P., & Menéndez, C. G., 2023, Datos climáticos y prácticas recomendadas para proyectar cambios en la distribución de especies. *Darwiniana, Nueva Serie*, *11*(1), 367–389. https://doi.org/10.14522/darwiniana.2023.111.1094

Casanueva A, Herrera S, Iturbide M, et al., 2020, Testing bias adjustment methods for regional climate change applications under observational uncertainty and resolution mismatch. Atmos Sci Lett. 21:21:e978. https://doi.org/10.1002/asl.978

Diez-Sierra, J., Iturbide, M., Fernández, J. et al., 2023, Consistency of the regional response to global warming levels from CMIP5 and CORDEX projections. Clim Dyn 61, 4047-4060. https://doi.org/10.1007/s00382-023-06790-y

Berio Fortini, L., Kaiser, L.R., Frazier, A.G. et al. (2023). Examining current bias and future projection consistency of globally downscaled climate projections commonly used in climate impact studies. Climatic Change, 176 (169). https://doi.org/10.1007/s10584-023-03623-z

ESCAT: Generació d'escenaris climàtics amb alta resolució per a Catalunya, 2013, Servei Meteorològic de Catalunya (SMC) and Barcelona Supercomputing Center – Centro Nacional de Supercomputación (BSC-CNS), Generalitat de Catalunya – Department de Territori i Sostenibilitat.

Expósito, F. J., A. González, J. C. Pérez, J. P. Díaz, and D. Taima, 2015: High-Resolution Future Projections of Temperature and Precipitation in the Canary Islands. J. Climate, 28, 7846–7856, https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0030.1.

Fernández, J., Frías, M.D., Cabos, W.D. *et al., 2019,* Consistency of climate change projections from multiple global and regional model intercomparison projects. *Clim Dyn* **52**, 1139–1156. https://doi.org/10.1007/s00382-018-4181-8

Fotheringham A, Wong D (1991) The modifiable areal unit problem in multivariate statistical analysis. Environment and Planning A, 23 (7),N1025–1044. doi:https://doi.org/10.1068/a231025.

Giorgi F, Jones C, Asrar GR (2009) Addressing climate information needs at the regional level: the CORDEX framework. WMO Bulletin, 58, 175–183. URL https://library.wmo.int/idurl/4/58817.

González-Abad, J., Iturbide, M., Hernanz, A., and Gutiérrez, J. M.: Pre-training for Deep Statistical Climate Downscaling: A case study within the Spanish National Adaptation Plan (PNACC), EGUsphere [preprint], https://doi.org/10.5194/egusphere-2025-3754, 2025.

Gutiérrez, J., Herrera García, S., San-Martín, D, Sordo, C, Rodríguez, J, Frochoso, M., Ancell, R, Cofiño, A., Pons, M nd Rodríguez, M., 2010, Escenarios Regionales Probabilísticos de Cambio Climático en Cantabria: Termopluviometría.

Gutiérrez JM, Maraun D, Widmann M, et al. An intercomparison of a large ensemble of statistical downscaling methods over Europe: Results from the VALUE perfect predictor cross-validation experiment. Int. J. Climatol. 2019;39:3750–3785. https://doi.org/10.1002/joc.5462

Hernanz, A., Correa, C., Rodríguez, E., Iturbide M., and Gutiérrez, J.M., 2025, Escenarios-PNACC 2024: Nueva colección de escenarios de cambio climático regionalizados del Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC).

Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B. *et al.* EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Reg Environ Change* **14**, 563–578 (2014). https://doi.org/10.1007/s10113-013-0499-2

Jelinski DE, Wu J (1996) The modifiable areal unit problem and implications for landscape ecology. Landscape Ecology, 11 (3), 129–140. URL https://doi.org/10.1007/BF02447512

Kang, H–J., Rahman, Md M., Park, S–M., Choi, J–H., Park, H–R., and Sung, H–C., 2025, Field Verification and Comparison of Field Applicability with Different Meteorological Data Sources of Species Distribution Models for American Bullfrogs (*Aquarana catesbeiana*), Journal of Herpetology 59 (3), 141-150, https://doi.org/10.1670/22-084

Lange, S., 2019, Trend-preserving bias adjustment and statistical downscaling with ISIMIP3BASD (v1.0). Geoscientific Model Development, 12, 3055–3070. https://doi.org/10.5194/gmd-12-3055-2019

Lange, S., Büchner, M., 2021, ISIMIP3b bias-adjusted atmospheric climate input data (v1.1). ISIMIP Repository. https://doi.org/10.48364/ISIMIP.842396.1

NEIKER, 2023, Escenarios de cambio climático de alta resolución para el País Vasco bajo las rutas de concentración de gases de efecto invernadero: RCP 4.5 y 8.5, Editorial: Ihobe, Sociedad Pública de Gestión Ambiental, Departamento de Desarrollo Económico, Sostenibilidad y Medio Ambiente, Gobierno Vasco.

Peral, C., B. Navascués, and P. Ramos. 2017. Serie de Precipitación Diaria en Rejilla Con Fines Climáticos. Technical report, AEMET. https://www.aemet.es/documentos/es/conocermas/recursos_en_linea/publicaciones_y_estudios/publicaciones/NT_24_AEMET/NT_24_AEMET.pdf.

Marta Rodríguez-Rey, Alberto Jiménez-Valverde, 2024, Differing sensitivity of species distribution modelling algorithms to climate data source, Ecological Informatics, 79, 102387, ISSN 1574-9541, https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2023.102387.

Taboada, F. G., Herrera García, S., Colina Vuelta, A., Fernández Iglesias, J. C., Guardado Fernández, C., Herrera Arenas, D., Sevilla Álvarez, J. y Obeso Muñiz, Í. (2025a). Escenarios de cambio climático de alta resolución sobre el Principado de Asturias: Análisis por comarcas y cuencas hidrográficas [Informe técnico]. Universidad de Oviedo; Principado de Asturias.

Taboada, F. G., Herrera García, S., Anadón Álvarez, R., Álvarez García, M. Á., Colina Vuelta, A., Fernández Iglesias, J. C., y Guardado Fernández, C. (2025b). *Elaboración de escenarios de cambio climático de alta resolución sobre el Principado de Asturias: Informe metodológico y manual de usuario del portal web para la consulta de los datos [Informe técnico].* Universidad de Oviedo; Principado de Asturias.

Wong DWS (2004) The Modifiable Areal Unit Problem (MAUP), pp. 571–575. Springer Netherlands, doi:10.1007/978-1-4020-2352-1_93

WARMING AND OBSERVATIONAL EFFECTIVE CLIMATE SENSITIVITY FROM LONG-TERM TEMPERATURE RECORDS UNDER FREE-TROPOSPHERIC CONDITIONS

Ayoze ÁLVAREZ-HERNÁNDEZ[1,2], Rosa D. GARCÍA[1,2], Omaira Elena GARCÍA[2], Marie Maile MCKENZIE[3], Sara IZQUIERDO[4], Juan José BUSTOS[2], Carlos MARRERO[2], Sergio Fabián LEÓN-LUIS[1,2,*], Pedro Pablo RIVAS-SORIANO[2], Enrique REYES[2], Ramón RAMOS[2], Carlos TORRES[2]

[1]TRAGSATEC, Madrid, Spain
[2]Izaña Atmospheric Research Center (IARC), State Meteorological Agency (AEMET), Santa Cruz de Tenerife, Spain
[3]Department of Geography and Environment, University of Hawai'i at Mānoa, Honolulu, HI, USA
[4]Aragon Delegation, State Meteorological Agency (AEMET), Zaragoza, Spain

** Now: Departamento de Física, Universidad de La Laguna, San Cristóbal de La Laguna, Spain*

aalvar70@tragsa.es, rgarci47@tragsa.es, ogarciar@aemet.es, mariemm@hawaii.edu, sizquierdop@aemet.es, jbustoss@aemet.es, cmarrerod@aemet.es, sleonlui@ull.es, privass@aemet.es, ereyess@aemet.es, rramosl@aemet.es, ctorresg@aemet.es

RESUMEN

Este estudio evalúa la representatividad de las condiciones de troposfera libre para estimar cambios en la temperatura del aire y un parámetro de sensibilidad climática efectiva observacional (λ) del sistema Tierra-atmósfera a escala global. Para ello, analizamos registros de temperatura a largo plazo de dos estaciones subtropicales de alta montaña: el Observatorio de Izaña (IZO, Tenerife, 2,37 km s.n.m.; 1916–2025) y el Observatorio de Mauna Loa (MLO, Hawái, 3,4 km s.n.m.; 1955–2025). Ambas series temporales fueron revisadas y homogeneizadas utilizando los reanálisis de temperatura ERA-20C y ERA5 junto con CLIMATOL. Los registros homogeneizados muestran que las observaciones de temperatura en condiciones de troposfera libre en estos emplazamientos son coherentes y representativas de la variabilidad climática subtropical a gran escala. A partir de estos conjuntos de datos y de la evolución de las concentraciones de los principales gases de efecto invernadero, estimamos λ y obtenemos valores del mismo orden que los derivados de estimaciones globales de sensibilidad climática en equilibrio. Estos resultados destacan el valor de los registros meteorológicos de alta montaña en condiciones de troposfera libre para estudiar el calentamiento a gran escala y la variabilidad climática.

ABSTRACT

This study evaluates the representativeness of free-tropospheric conditions for estimating air-temperature changes and an observational effective climate-sensitivity parameter (λ) of the Earth–atmosphere system at a global scale. To this end, we analyse long-term temperature records from two subtropical high-mountain stations: Izaña Observatory (IZO, Tenerife, 2.37 km a.s.l.; 1916–2025) and Mauna Loa Observatory (MLO, Hawaii, 3.4 km a.s.l.; 1955–2025). Both time series were revised and homogenised using ERA-20C and ERA5 temperature reanalyses with CLIMATOL. The homogenised records show that free-tropospheric temperature observations at these sites are consistent and representative of large-scale subtropical climate Variability. Based on these datasets and the evolution of the main greenhouse-gas concentrations, we estimate λ and obtain values of the same order as those derived from global estimates of equilibrium climate sensitivity. These results highlight the value of high-mountain meteorological records under free-tropospheric conditions for studying large-scale warming and climate variability.

Keywords: global warming, climate sensitivity, high-mountain observatories, radiative forcing, homogenisation, free-troposphere

INTRODUCTION

High-mountain observatories exposed to free-tropospheric air masses provide high-quality measurements for studying atmospheric variability and long-term climate change. Owing to their altitude and observing conditions, sites such as Mauna Loa Observatory (MLO) and Izaña Observatory (IZO) are largely decoupled from local surface influences and are widely used as references for monitoring atmospheric composition (see, e.g., Torres et al., 2026). Although these observatories are primarily recognised for this role, they also provide valuable meteorological observations that remain comparatively underexploited. In particular, long-term temperature records from these sites offer a unique opportunity to investigate large-scale climate variability under free-tropospheric conditions, in environments largely unaffected by urbanisation or land-use changes.

The IZO temperature record extends back to 1916, while MLO provides observations since 1955. These long-term series exhibit clear warming signals and can be used to investigate the temperature response to sustained changes in radiative forcing caused by the increase in greenhouse gas (GHG) concentrations. In this study, we evaluate the representativeness of IZO and MLO temperature records for monitoring large-scale warming and use them to estimate an effective climate-response parameter.

METHODS

Annual-mean air-temperature records from IZO and MLO were analysed for complete calendar years up to 2025. Both series were revised and homogenised using ERA-20C, ERA5 and the CLIMATOL software (Guijarro, 2004). This analysis did not identify statistically significant breakpoints or artificial discontinuities in either the IZO or MLO series, and consequently no corrections were applied. To assess the representativeness of the IZO and MLO warming rates, we also used global land-ocean surface temperature data from the GISTEMP v4 analysis of the Goddard Institute for Space Studies (GISS; Hansen et al., 2010; Lenssen et al., 2024). Anomalies were computed relative to 1961–1990. Warming trends were obtained from least-squares linear fits, with uncertainties estimated using a residual block bootstrap Monte Carlo approach (see, e.g., Mudelsee, 2019), with 10,000 realisations and 7-year blocks.

The long-term atmospheric evolution of the main GHGs (CO2, CH4 and N2O) over 1916–2025 was represented using global mean concentrations based on Antarctic ice-core and in situ measurements (Meinshausen et al., 2017), complemented by IZO observations where available. GHG radiative forcing (ΔFGHG) was computed from these values using the empirical expressions recommended by the IPCC (IPCC, 2021). Other forcings, such as aerosols and land-use changes, are not explicitly included and may also have influenced the observed temperature evolution over the analysed period.

Following Malamud et al. (2011), effective climate sensitivity is here defined as the linear response of temperature to GHG radiative forcing, where ΔT represents the change in temperature relative to a reference period. This parameter provides an empirical measure of how the observed temperature covaries with the historical increase in well-mixed GHG forcing. It should therefore not be interpreted as the equilibrium climate sensitivity obtained from idealised CO2-doubling experiments (IPCC, 2021), but as an effective, transient estimate over the analysed historical period. We estimated as the slope of the linear fit between ΔT and ΔFGHG, using the same bootstrap approach described above to quantify its uncertainty.

RESULTS AND DISCUSSION

The annual temperature anomalies (1961–1990 baseline) for IZO, MLO and GISS are shown in Fig. 1 together with the corresponding linear fits and uncertainty bands. The derived warming rates are 0.17 ± 0.02, 0.22 ± 0.06 and 0.11 ± 0.01 ºC decade-1 for IZO, MLO, and GISS, respectively. The value from the global GISS mean is lower, possibly due to differences between free-tropospheric and global surface temperature responses, while IZO and MLO are consistent with each other within uncertainties, suggesting that they capture a common large-scale subtropical climate signal.

The consistency between IZO and MLO is further reinforced when the analysis is restricted to the common period (1955–2025), yielding warming rates of 0.23 ± 0.04, 0.22 ± 0.06, and 0.17 ± 0.01 ºC decade-1 for IZO, MLO, and GISS, respectively. In this case, the warming rates at both mountain observatories are nearly identical and marginally consistent with the global trend. Additional comparisons with the local GISS grid cells containing IZO and MLO (not shown) also support the subtropical representativeness of both records.

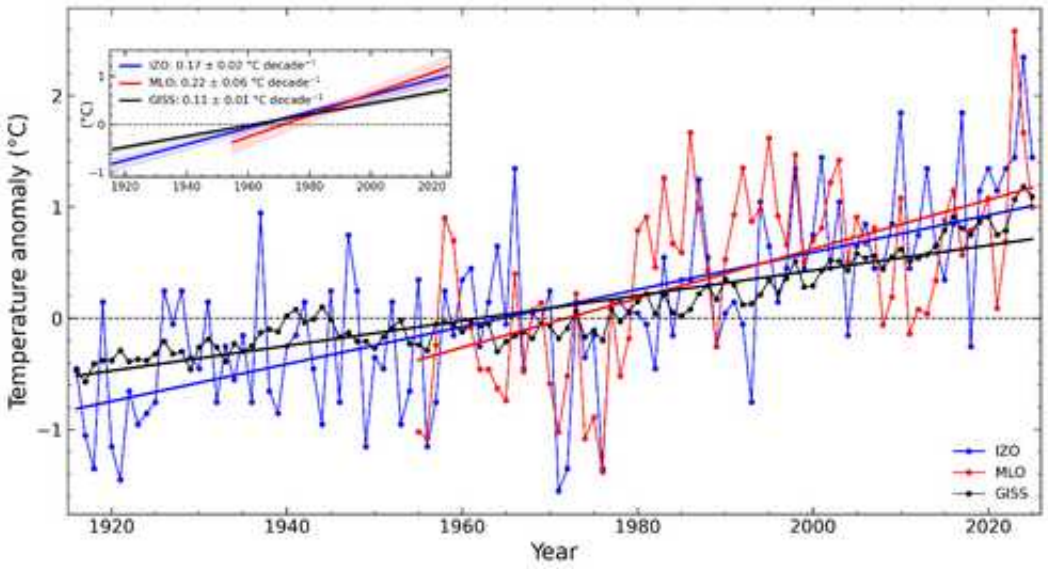


Figure 1. Temperature anomalies (relative to 1961–1990) for IZO, MLO, and GISS. The inset displays the corresponding linear trends with their associated 68% uncertainty bands.

Figure 2a shows the annual evolution of GHG radiative forcing, including the individual and total contributions from CO2, CH4 and N2O. Figures 2b and 2c display the ΔT–ΔFGHG relationships obtained from the IZO and MLO temperature anomalies and total GHG forcing. Linear fits to these relationships yield λ = 0.72 ± 0.08 (IZO) and λ = 0.70 ± 0.19 ºC W-1 m2 (MLO). These values are of the same order as the value of 0.81 (0.68–1.08) ºC W-1 m2, inferred from the IPCC equilibrium climate sensitivity estimate of 3 (2.5–4) ºC for a doubling of CO2 (IPCC, 2021).

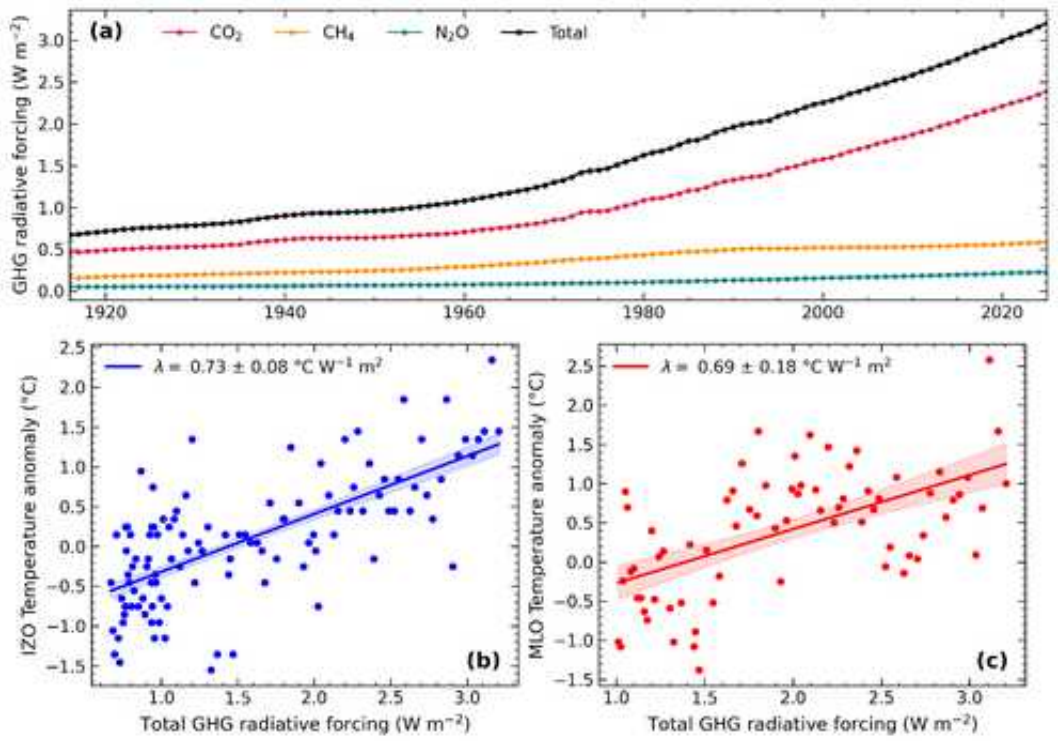


Figure 2. Evolution of GHG radiative forcing (a) and ΔT–ΔFGHG relationships for IZO (b) and MLO (c). The slopes of the linear fits in (b,c) provide the estimated λ values.

CONCLUSIONS

We analysed long-term temperature records from the free-tropospheric high-mountain observatories IZO and MLO, finding that both series capture a coherent large-scale subtropical warming signal, slightly higher than but comparable to the GISS global rate. By relating the IZO and MLO temperature anomalies to the historical increase in GHG radiative forcing, we infer observational effective climate-sensitivity values of the same order as values derived from the equilibrium climate-sensitivity range assessed by the IPCC from idealised CO2-doubling experiments. These results highlight the potential of strategically located free-tropospheric observatories to provide simple, observation-based constraints on climate-response parameters.

AGRADECIMIENTOS

This work is part of the activities of the WMO Izaña Testbed for Aerosols and Water Vapour Remote Sensing Instruments. We thank all past and present IZO staff, especially the observers, for sustaining a 110-year climatological record, and the MLO team for maintaining their long-term record since 1955.

REFERENCES

Guijarro, J. A. (2004). CLIMATOL: software libre para la depuración y homogeneización de datos climatológicos. In *El clima entre el mar y la montaña* (pp. 493–502). Asociación Española de Climatología. http://hdl.handle.net/20.500.11765/9036

Hansen, J., Ruedy, R., Sato, M., & Lo, K. (2010). Global surface temperature change. *Reviews of Geophysics, 48*, RG4004. https://doi.org/10.1029/2010RG000345

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). *Climate change 2021: The physical science basis.* Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009157896

Lenssen, N., Schmidt, G. A., Hendrickson, M., Jacobs, P., Menne, M., & Ruedy, R. (2024). A GISTEMPv4 observational uncertainty ensemble. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 129*(17), e2023JD040179. https://doi.org/10.1029/2023JD040179

Malamud, B. D., Turcotte, D. L., & Grimmond, C. S. B. (2011). Temperature trends at the Mauna Loa observatory, Hawaii. *Climate of the Past, 7*, 975–983. https://doi.org/10.5194/cp-7-975-2011

Meinshausen, M., Vogel, E., Nauels, A., Lorbacher, K., Meinshausen, N., Etheridge, D. M., Fraser, P. J., Montzka, S. A., Rayner, P. J., Trudinger, C. M., Krummel, P. B., Beyerle, U., Canadell, J. G., Daniel, J. S., Enting, I. G., Law, R. M., Lunder, C. R., O'Doherty, S., Prinn, R. G., ... Weiss, R. (2017). Historical greenhouse gas concentrations for climate modelling (CMIP6). *Geoscientific Model Development, 10*, 2057–2116. https://doi.org/10.5194/gmd-10-2057-2017

Mudelsee, M. (2019). Trend analysis of climate time series: A review of methods. *Earth-Science Reviews, 190*, 310–322. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.12.005

Torres, C. J., Milford, C., Barreto, Á., Bustos, J. J., García, O. E., García, R. D., Marrero, C., Prats, N., Ramos, R., Redondas, A., Reyes, E., Rivas-Soriano, P. P., Romero-Campos, P. M., Trasobares, I., Schneider, M., Yela, M., Belmonte, J., Almansa, F., López-Solano, C., ... Tovar, I. (2026). *Izaña Atmospheric Research Center activity report 2023–2024*. State Meteorological Agency (AEMET) and World Meteorological Organization. https://doi.org/10.31978/666-26-001-0

CAMBIOS EN LA FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN DE LA TEMPERATURA MEDIA ANUAL EN ESPAÑA, 1979-2022

Fernando S. RODRIGO[1]

[1]*Dpto. Química y Física, Universidad de Almería*

frodrigo@ual.es

RESUMEN

El problema del cambio climático puede entenderse como una combinación de dos operaciones estadísticas: la función de distribución representativa de la variable climática se desplaza, como resultado de un cambio en el parámetro de localización, y se deforma o reescala, como consecuencia de un cambio en el parámetro de escala. Este trabajo aplica este modelo conceptual a las temperaturas medias diarias a escala anual de 40 localidades españolas desde 1979 a 2022. La hipótesis matemática es que la relación entre dos subperiodos distintos (1979-1993 y 1994-2022) puede describirse como una relación lineal, y la hipótesis física es que las traslaciones están relacionadas con cambios en el forcing radiativo, mientras que los reescalados están ligados a fluctuaciones de la circulación atmosférica. Los resultados confirman ambas hipótesis, aunque parece necesario extender el estudio a otras variables y escalas espacio-temporales.

Palabras clave: Función de distribución, parámetros de localización y escala, temperatura, España.

ABSTRACT

Climatic change may be understood as a combination of two statistical operations: distribution function is shifted (change in the location parameter), and it is rescaled (change in the scale parameter). This work applies this conceptual model to daily mean temperatures at annual time scale in 40 Spanish localities from 1979 to 2022. The mathematical hypothesis is that the relationship between two different periods (1979-1993 and 1994-2022) may be described using a linear relationship, and physical hypotheses are that shifts are related to changes in radiative forcing, meanwhile rescaling is linked to fluctuations of atmospheric circulation. Results confirm theses hypotheses, although it seems necessary to enlarge the study to other variables and spatio-temporal time scales.

Key words: Distribution function, location and scale parameters, temperatures, Spain.

INTRODUCCIÓN

Las variables climáticas pueden representarse mediante una función de distribución con sus correspondientes parámetros de localización y escala. En el caso de las temperaturas, estas vienen bien representadas por la distribución normal, con el valor medio como parámetro de localización y la desviación típica como parámetro de escala (Katz, 1993). En este contexto, el problema del cambio climático puede entenderse como la combinación de dos operaciones estadísticas: desplazamientos, como resultado de cambios en el parámetro de localización, y reescalado, como resultado de cambios en el parámetro de escala. Estos cambios, a su vez, determinan cambios en la probabilidad de sucesos extremos (Katz y Brown, 1992). Una hipótesis de trabajo es que los desplazamientos están provocados por cambios en el forcing radiativo, mientras que los cambios en la forma de la función de distribución están afectados por cambios en la circulación atmosférica (Peterson et al., 2008). El principal objetivo de este trabajo es aplicar este modelo conceptual a un conjunto de 40 series de temperatura media diaria a escala anual en la Península Ibérica durante el periodo 1979-2022.

DATOS

Las series de temperatura media diaria fueron obtenidas de la base de datos ECA&D (disponible en http:www.ecad.edu, Klein-Tank et al., 2002). Se trata de un conjunto de 40 estaciones distribuidas uniformemente a través de la Península Ibérica, que cubren los principales dominios climáticos del país (Martín Vide y Olcina Cantos, 2001). Como hipótesis de partida, los cambios en la función de distribución se deben a factores causales tales como el forcing radiativo generado por el aumento en la concentración de gases de efecto invernadero (Q), el generado por aerosoles volcánicos (V, ambos expresados en W/m2), así como los índices de teleconexión (I, adimensionales) que regulan las fluctuaciones de la circulación atmosférica. Los valores de Q a escala anual, desde 1979 hasta 2022, pueden obtenerse a partir del índice AGGI (datos disponibles en http://gml.noaa.gov/aggi/aggi.html, Montzka, 2023), y los valores de V pueden obtenerse para el periodo 1979-2015 a partir del trabajo de Schmidt et al. (2018). Entre los principales patrones de teleconexión que afectan a la Península Ibérica se encuentran la NAO, EA, EA/WR y SCAN (López-Bustins et al., 2008). Los índices mensuales de estos patrones están disponibles en el Climate Prediction Center (http://www.ncep.noaa.gov/teledoc). En este caso, estos valores se promediaron para obtener un índice anual.

METODOLOGÍA

En primer lugar, los datos de temperatura fueron regionalizados para reducir la dimensionalidad del problema. Para este propósito se utilizó el análisis cluster, siguiendo el método de Ward y usando la distancia euclídea cuadrática (Fernández-Montes y Rodrigo, 2012). Posteriormente, se trabajó con las series medias de cada cluster. La aplicación del método de sumas acumulativas de desviaciones (Liu et al., 2016) permitió establecer una periodización, que sirvió para distinguir entre diferentes "realizaciones" de nuestra variable climática. Por "realizaciones" entendemos el conjunto de valores de nuestra variable en diferentes subperiodos (no necesariamente consecutivos) o bajo distintas condiciones de algún factor causal, como por ejemplo bajo dos fases distintas, positiva y negativa, de los índices de teleconexión.

Si X=xt; t=1,…,N es el conjunto de valores de la variable climática (N años), sean X1, X2 X dos realizaciones de X, con N1 y N2 datos (N1+N2 N). Por hipótesis, la relación entre X1 y X2 es una relación lineal de la forma,

$$X_2 = bX_1 + a, \qquad b \in \Re^*,\ a \in \Re \tag{1}$$

Aceptando la hipótesis de normalidad, el valor medio de X1 es 1 y su desviación típica 1, mientras que para X2 son, respectivamente, 2 = b1 + a, y 2 = b1. La relación entre las funciones de distribución F2 y F1 correspondientes a ambas realizaciones es

$$F_2(x) = F_1\left(\frac{x}{b} - a'\right) \tag{2}$$

donde a' = a/b. La expresión (2) indica que F2(x) resulta de una transformación de F1(x) mediante un reescalado, dado por el parámetro b (expansión si b>1 o contracción si b<1) y una traslación de magnitud a'. Si sólo hay traslación, b = 1 y a'=a. Si sólo hay reescalado, a=0 y b≠1. El caso más general es la combinación de ambas operaciones, a≠0, b≠1. En este trabajo, la hipótesis de normalidad se comprobó usando el test de Kolmogorov-Smirnov con la corrección de Lilliefords. Aceptamos que a≠0 al nivel de significación 0.05 si se verifica la hipótesis alternativa del test-t de diferencia entre las medias, y b≠1 al nivel de significación 0.05 si se verifica la hipótesis alternativa del test F de comparación de varianzas.

RESULTADOS

La Figura 1 muestra la regionalización resultante de la aplicación del análisis cluster al conjunto de 40 estaciones estudiadas.

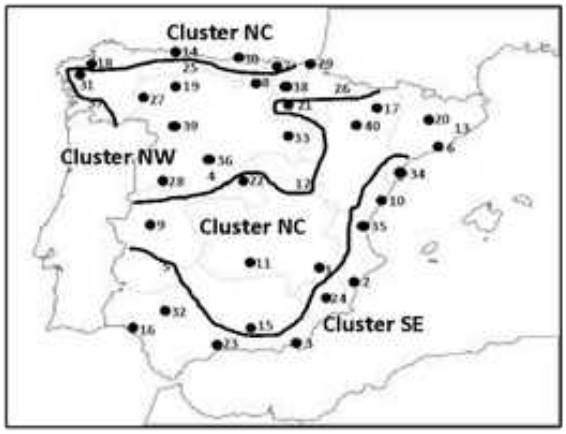


Figura 1. Regionalización de las 40 series de temperatura media diaria anual (1979-2022)

Se obtuvieron tres clusters diferenciados, denominados SE, NC y NW. El cluster SE comprende el conjunto de estaciones distribuidas por el sur y la costa mediterránea, el cluster NW corresponde a estaciones localizadas en la Meseta Norte, mientras que el cluster NC comprende el conjunto de estaciones distribuidas a lo largo de un eje SW-NE, así como el conjunto de estaciones litorales al norte de la Península. La Figura 2(a) muestra las series temporales de cada cluster. Todas muestran una tendencia significativa al nivel de significación 0.05, creciente y del orden de 0.3C/década. Este resultado es coherente con los resultados de González-Hidalgo et al (2020), quienes detectan una tendencia de 0.10C/década para el periodo 1916-2015 y un aumento de esta tendencia durante las últimas décadas del siglo XX y comienzos del siglo XXI, llegando a ser del orden de 0.21C/década para el periodo 1961-2018 (AEMET, 2023).

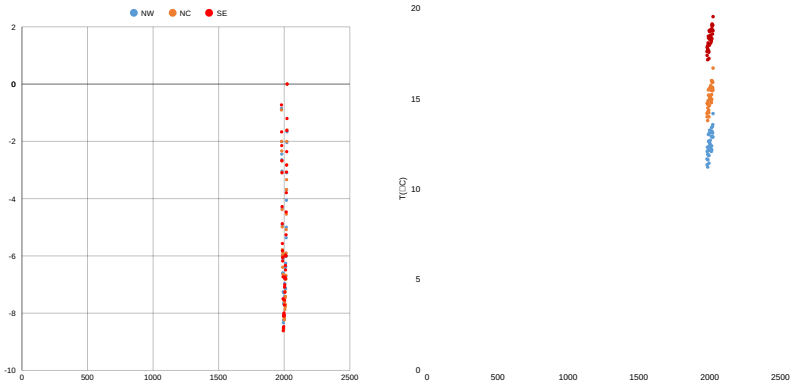


Figura. 2. (a) Series temporales de la temperatura media diaria para los 3 clusters obtenidos (se indican la ecuación de regresión lineal con el tiempo, el coeficiente de correlación r y el coeficiente de determinación R2); (b) Series de suma acumulativa de desviaciones para cada cluster.

La Figura 2(b) muestra la aplicación del método de desviaciones acumulativas. El método de suma de desviaciones acumulativas muestra un mínimo en 1993 común a los tres clusters, lo cual permite obtener una división entre dos subperiodos, 1979-1993 y 1994-2022. El hecho de que esta división sea similar para los tres clusters sugiere que no responde a factores locales y/o regionales, sino más bien a factores a escala sinóptica, hemisférica, o global. Refleja además que el calentamiento desde 1970 no ha sido monótono (Sandonis et al., 2021). La Tabla 1 muestra los estadísticos correspondientes a ambas realizaciones (todas las series verificaron la hipótesis de normalidad al nivel de significación de 0.05).

En los tres clusters se aprecia una traslación significativa del orden de +0.9C, mientras que no se aprecian cambios en la varianza (b 1). La Figura 3 muestra el comportamiento de las funciones de distribución correspondientes a ambos periodos para el caso del cluster NC (las gráficas para los otros dos clusters son similares).

Parámetro	**Cluster NW**	**Cluster NC**	**Cluster SE**
1(C)	11.9±0.2	14.5±0.2	17.7±0.2
2(C)	12.8±0.2	15.4±0.2	18.6±0.2
a(C)	+0.9±0.4	+0.9±0.4	+0.9±0.4
1(C)	0.49 (0.36,0.77)	0.47(0.34,0.73)	0.37(0.27,0.58)
2(C)	0.52 (0.41,0.71)	0.48 (0.38,0.69)	0.36 (0.25,0.49)
b	1.07	1.02	1.02

Tabla 1. Estadísticos de los subperiodos 1979-1993 (N1=15) y 1994-2022 (N2=29) para los tres clusters. =valor medio; =desviación típica (intervalo de confianza al 95%); a= parámetro de traslación; b= parámetro de reescalado

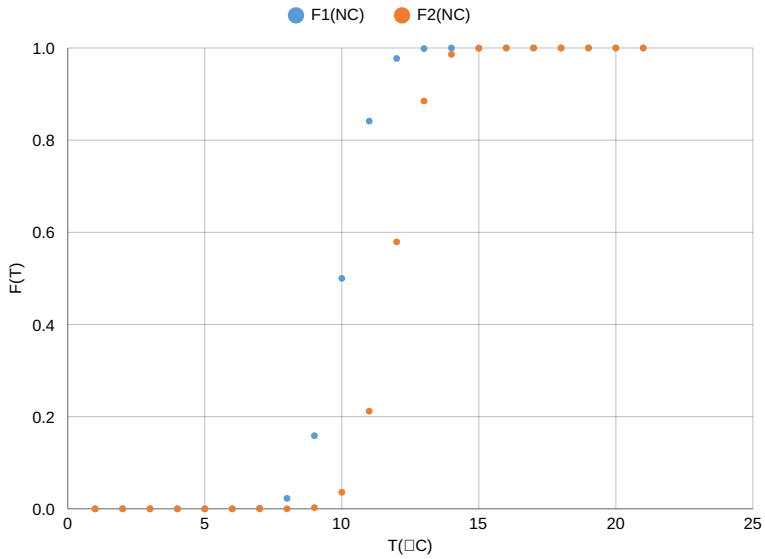


Figura 3. Funciones de distribución F1 y F2 correspondientes a los periodos 1979-1993 (línea continua) y 1994-2022 (línea discontinua) para el cluster NC.

Además del forcing radiativo Q hay que tener en cuenta el papel de los aerosoles volcánicos para entender estas traslaciones. Podemos relacionar el hecho de que el primer subperiodo sea más frío con las erupciones volcánicas de El Chichón en 1982 y el Pinatubo en 1993. Posteriormente, no ha habido erupciones volcánicas de esta magnitud, lo cual justificaría la periodización encontrada usando el método de suma de desviaciones acumulativas. Un modelo de regresión múltiple entre la temperatura media anual μi como variable dependiente, y Qi, Vi, Ii (i=1979, …, 2015) como variables independientes, ofrece como resultado una relación significativa al nivel de significación 0.05 entre μ, Q y V, con coeficientes de regresión del orden de 0.7C/Wm-2 para Q y 0.4 C/Wm-2 para V. El papel de los índices de teleconexión no es estadísticamente significativo en este modelo, lo cual puede deberse a que trabajamos a escala anual, que puede no ser apropiada para describir el comportamiento de los patrones de teleconexión, además de que las fluctuaciones de la circulación atmosférica pueden quedar enmascaradas o incluso canceladas si comparamos su comportamiento en las diferentes estaciones del año. No obstante, podemos aplicar nuestro método comparando las realizaciones correspondientes a las dos fases (positiva y negativa) del índice de teleconexión. Así, por ejemplo, la Figura 4 muestra el comportamiento de las funciones de distribución correspondientes a la fase positiva y negativa de la NAO en el caso del cluster NC.

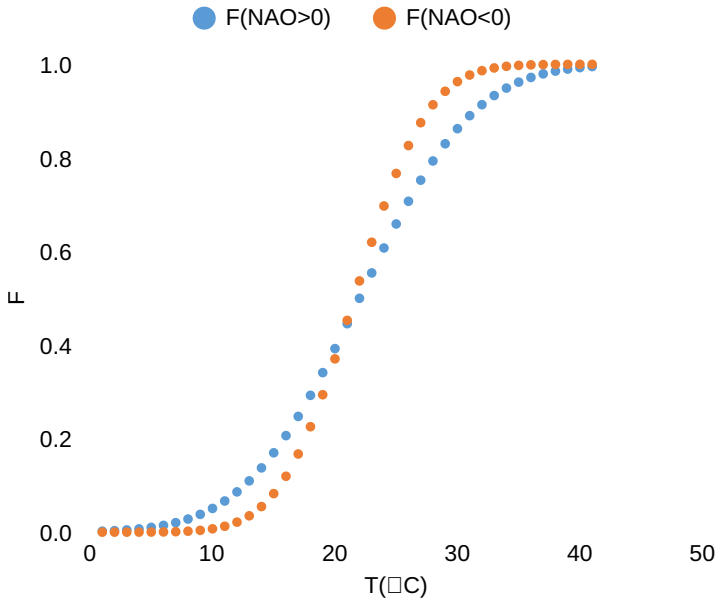


Figura 4. Funciones de distribución de la temperatura media diaria anual del cluster NC bajo las dos fases de la NAO, positiva (línea discontinua) y negativa (línea continua).

En este caso no hay traslación, sólo reescalado, con b=NAO<0/NAO>0 = 0.64, significativamente ≠1 al nivel de significación 0.05, indicando menor variabilidad en la temperatura durante la fase negativa. Bajo una NAO negativa el aumento de la nubosidad implica mayores temperaturas mínimas y menores temperaturas máximas diarias, con lo cual se obtiene un menor rango diurno de temperaturas y una disminución de la variabilidad de la temperatura media (Trigo et al., 2002).

CONCLUSIONES

En este trabajo se ha demostrado cómo el modelo estadístico conceptual utilizado, pese a su simplicidad, describe bien los cambios de las variables climáticas. Los resultados parecen confirmar la hipótesis de que las traslaciones (cambios en el valor medio) resultan del forcing radiativo, mientras que los reescalados (cambios en la varianza) son efecto de las fluctuaciones de la circulación atmosférica, tal y como se reflejan en los índices de teleconexión. No obstante, parece aconsejable trabajar a otras escalas temporales (estacional, mensual), y extender el estudio a otras variables, como temperaturas máximas y mínimas o precipitación. Por otra parte, el método es aplicable a series locales, lo cual permite indagar en los posibles cambios en la probabilidad de sucesos extremos como consecuencia de estos cambios en la función de distribución. Este será el objeto de futuros trabajos.

REFERENCIAS

AEMET (2023). *Olas de calor en España desde 1975,* Área de Climatología y Aplicaciones Operativas. Agencia Española de Meteorología.

Fernández-Montes, S., Rodrigo, F.S.(2012). Trends in seasonal indices of daily temperature extremes in the Iberian Peninsula, 1929-2005. *Int. J. Climatol.* 32, 2320-2332. DOI:10.1002/joc.3399.

Katz, R.W. (1993). Towards a statistical paradigm for climate change. *Clim. Res.* 2, 167-175. DOI: 10.3354/cr002167.

González-Hidalgo, J.C., Peña-Angulo, D., Beguería, S., Brunetti, M., (2020). MOTEDAS century: A new high-resolution secular monthly maximum and minimum temperature grid for the Spanish mainland (1916–2015). *Int. J. Climatol.* 40, 5308–5328. DOI:10.1002/joc.6520

Katz, R.W., Brown, B.G. (1992). Extreme events in a changing climate: variability is more important tan averages. *Clim. Change.* 21, 289-302. DOI:10.1007/BF00139728.

Klein-Tank, A.M.G. et al. (2002). Daily dataset of 20th-century surface air temperature and precipitation series for the European climate assessment. *Int. J. Climatol.* 22, 1441-1453. DOI:10.1002/joc.773

Liu, Q. et. al. (2016). A Review of the Detection Methods for Climate Regime Shifts. *Discrete Dyn. Nat. Soc.* 2016. Article ID 3536183. DOI:10.1155/2016/3536183.

López-Bustins, J.A. et al. (2008). Iberia winter rainfall trends based upon changes in teleconnection and circulation patterns. *Glob. Planet. Change.* 63, 171-176. DOI:10.1016/j.gloplacha.2007.09.002

Martín-Vide, J., Olcina Cantos, J. (2001). *Climas y tiempos de España*. Alianza Editorial, Madrid.

Montzka, S.A. (2023). *The NOAA annual greenhouse gas index (AGGI).* https://gml.noaa.gov/aggi/aggi.html (acceso 26 Febrero 2026).

Peterson, T.C. et al.. (2008). Why Weather and Climate Extremes Matter, in: Karl, T.R., Meehl, G.A., Miller, C.D., Hassol, S.J., Waple, A.M., Murray, W.L. (Eds.), *Weather and Climate Extremes in a Changing Climate. A Report by the U.S. Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research*, Washington, DC., pp. 11-34.

Sandonis, L., González-Hidalgo, J., Peña-Angulo, D., Beguería, S. (2021). Mean temperature evolution on the Spanish mainland 1916-2015. *Clim. Res.* 82, 177–189. DOI:10.3354/cr01627

Schmidt, A. et al. (2018). Volcanic Radiative Forcing From 1979 to 2015. *J. Geophys. Res.-Atmos*123. 12.491-12.508. DOI:10.1029/2018JD028776.

Trigo, R.M., et. al (2002). The North Atlantic Oscillation influence on Europe: climate impacts and associated physical mechanisms. *Clim. Res*. 20, 9-17. DOI:10.3354/cr020009

PRIMEROS PASOS HACIA LA EMULACIÓN MEDIANTE DEEP LEARNING DE MODELOS CLIMÁTICOS A CONVECTION PERMITTING: UNA APLICACIÓN EN EL PROYECTO IMPETUS4CHANGE (I4C)

Samuel REYES-ELGUETA[1], Jose GONZÁLEZ-ABAD[1],
Jorge BAÑO-MEDINA[1], Jesús FERNÁNDEZ[1]

*[1]Instituto de Física de Cantabria (IFCA),
CSIC-Universidad de Cantabria, Santander, España.*

reyes@ifca.es, gonzabad@ifca.es,
bmedina@ifca.es, jesus.fernandez@ifca.es

RESUMEN

La información climática de alta resolución es clave para evaluar riesgos regionales, pero el alto coste de los modelos de convección explícita (CPMs) limita la cuantificación de incertidumbres. El objetivo de esta comunicación es presentar la implementación de un emulador de CPM basado en *deep learning* dentro del proyecto Impetus4Change (I4C), orientado a generar proyecciones masivas a escala kilométrica (~3 km) a partir de diversos GCMs y escenarios de CMIP6.

La metodología se basa en el marco de emulación perfecta (*perfect framework*) mediante la arquitectura DeepESD. El modelo fue entrenado con simulaciones de CPM para temperatura y precipitación diarias sobre la región de los Alpes, utilizando predictores atmosféricos de gran escala degradados a 1.5°. Para evaluar su rendimiento, se analizó su capacidad para reproducir estadísticos descriptivos, valores extremos y su evolución temporal, así como su transferibilidad a GCMs de CMIP6 no vistos durante el entrenamiento (*hard transferability*). Los resultados muestran que el emulador reproduce con alta capacidad los valores medios de precipitación y con habilidad moderada sus extremos. Crucialmente, la consistencia del modelo al aplicarse a GCMs no vistos muestra potencial para generar conjuntos multi-modelo a escala kilométrica con bajo coste computacional.

Palabras clave: Aprendizaje Profundo, Modelación Climática Regional, Emulación de RCM.

ABSTRACT

High-resolution climate information is essential for regional impact and risk assessment, yet the high cost of convection-permitting models (CPMs) hinders uncertainty quantification. The objective of this study is to implement a deep learning-

-based CPM emulator within the Impetus4Change (I4C) project to generate massive projections at a kilometer scale (~3 km) from a wide range of GCMs and CMIP6 scenarios.

The methodology relies on a perfect framework design using the DeepESD architecture. The model was trained using daily temperature and precipitation CPM simulations over the Alps, utilizing large-scale atmospheric predictors degraded to 1.5°. To evaluate its performance, an assessment was carried out regarding its ability to reproduce descriptive statistics, extreme values, and their temporal evolution, alongside its transferability to CMIP6 GCMs not seen during training (hard transferability). The results show that the emulator reproduces precipitation mean values with high capacity and its extremes with moderate skill. Crucially, the model's consistency when applied to unseen GCMs demonstrates the potential to generate multi-model ensembles at a kilometer scale with low computational cost.

Key words: Deep Learning, Regional Climate Modelling, RCM Emulation.

INTRODUCCIÓN

La disponibilidad de información climática a escala kilométrica(~1-3 km) es fundamental para la evaluación de impactos regionales. A esta resolución, los modelos de convección explícita (CPMs por sus siglas en inglés) mejoran significativamente la representación de procesos locales clave, como la convección profunda y la precipitación intensa (Kendon et al., 2017; Prein et al., 2015). Sin embargo, su elevado coste computacional limita el número de simulaciones disponibles, lo que restringe la capacidad de explorar las múltiples fuentes de incertidumbre inherentes a las proyecciones climáticas regionales —como la sensibilidad al modelo global, a los esquemas de parametrización física o a los escenarios de emisiones— dificultando así la cuantificación de incertidumbre a escala regional (Lucas-Picher et al., 2021).

Para mitigar esta limitación, en los últimos años ha proliferado el desarrollo de emuladores de modelos regionales del clima (RCMs) basados en *deep learning* (Baño-Medina et al., 2024; Doury et al., 2023; Kendon et al., 2025). *Dichos emuladores son capaces de generar simulaciones de 100 años a escala regional en cuestión de minutos u horas, lo que abre la puerta a explorar el espacio de incertidumbre de las proyecciones climáticas regionales de forma computacionalmente viable*. No obstante, una parte significativa de la literatura existente se ha centrado en emular modelos a resoluciones moderadas (~10 km, e.g., Doury et al., 2023), en los que los procesos convectivos aún pueden parametrizarse. El salto a resoluciones propias de los CPMs (~3 km), donde la convección debe resolverse explícitamente,

introduce una complejidad adicional cuya viabilidad para los emuladores de deep learning no ha sido suficientemente explorada.

El objetivo de esta comunicación es evaluar la robustez y la capacidad de generalización ante modelos globales no vistos (*hard transferability*) de un emulador estadístico a resolución CPM (~3 km). Este trabajo se enmarca en el proyecto Horizon Europe Impetus4Change (I4C), donde este enfoque se aplica de forma sistemática a 6 modelos de circulación generales (GCMs) de CMIP6 (126 simulaciones) para el período 1950–2100 bajo diversos escenarios de forzamiento (SSP1-2.6 a SSP5-8.5), lo que permite generar un volumen masivo de 9.430 años de proyecciones a escala kilométrica con un coste computacional reducido. Dicho conjunto de simulaciones amplía el muestreo del espacio de incertidumbre asociado al modelo global conductor, permitiendo caracterizar mejor esta fuente de incertidumbre en la modelización regional.

METODOLOGÍA

El enfoque metodológico se basa en la emulación estadística de una cadena de regionalización GCM-RCM-CPM mediante el modelo de deep learning DeepESD, ampliamente utilizado en estudios de reducción de escala o *downscaling* (Baño-Medina et al., 2022). El modelo de regionalización de referencia consiste en un RCM a 12 km con un CPM anidado a 3 km.

Para el entrenamiento se sigue el *perfect framework* (Doury et al., 2023, Baño-Medina et al., 2024), en el que los predictores no se extraen directamente del GCM sino de las variables de gran escala del RCM degradadas, en nuestro caso, a ~150 km. El término "perfecto" alude a que, al usar predictores derivados del propio RCM, se garantiza la coherencia temporal entre el espacio predictor y el predictando durante el entrenamiento, lo que permite al emulador aprender la función de regionalización RCM-CPM con mayor precisión.

Sin embargo, esta elección tiene una contrapartida: el emulador no aprende los cambios que el RCM introduce en las variables del GCM, que son los predictores reales durante la fase de aplicación. Esto puede generar sesgos difícilmente corregibles al transferir el emulador a GCMs no vistos durante el entrenamiento, lo que constituye precisamente el desafío de *hard transferability* que este trabajo evalúa.

2.1 Región de estudio

El dominio de estudio se centra en la región alpina, específicamente el dominio ALPX-3 definido en el marco de CORDEX. Los predictores se extraen de un dominio

extendido (15°O–24°E, 33°N–60°N) para capturar los patrones de circulación a gran escala, mientras que el predictando corresponde al dominio nativo de la simulación CPM de referencia utilizada como base del emulador. La selección de esta región viene determinada estrictamente por el dominio nativo de la simulación CPM de referencia utilizada en este estudio. Su compleja orografía y alta variabilidad climática la convierten en un caso de prueba ideal, ya que estas características justifican el valor añadido de los CPM frente a resoluciones menores y ofrecen un entorno exigente para evaluar la robustez del emulador ante gradientes topográficos extremos.

2.2 Configuración del Experimento y Datos

Simulaciones realizadas por el modelo numérico *Weather Research and Forecasting* (WRF), en su configuración de convección explícita WRF451R-CI4C (Teichmann et al., 2023) sobre una malla de 3 km de resolución, actúa como referencia (*ground truth*) y fuente de los predictandos (precipitación y temperaturas media, mínima y máxima). A esta resolución, este CPM captura procesos extremos climáticos inaccesibles para modelos parametrizados. Como predictores, en la fase de entrenamiento, se utilizan las salidas del mismo sistema WRF451R-CI4C pero sobre una malla de 12 km, degradada mediante interpolación conservativa a 1.5° (URCM, en adelante). Esta configuración aproxima los predictores a la resolución típica de un GCM (CMIP6), mejorando la consistencia con los predictores que se utilizarán después en la fase de aplicación del emulador. La selección de los periodos temporales de entrenamiento (1994–2013 y 2081–2100) viene determinada estrictamente por la disponibilidad de las simulaciones del CPM de referencia utilizado. La disponibilidad únicamente de esos períodos responde a una decisión metodológica del proyecto I4C: al cubrir los extremos del período de simulación, el emulador opera en modo interpolación temporal para el resto del siglo XXI, condición en la que los modelos de deep learning muestran un comportamiento más robusto que en extrapolación (Doury et al., 2023). Los años 2014 y 2080 se reservaron como conjunto de validación interna durante el entrenamiento, empleados para aplicar early stopping: una técnica que detiene el entrenamiento cuando el error en datos no vistos deja de mejorar, evitando así el sobreajuste del modelo.

2.3 Arquitectura y Configuración de DeepESD

La emulación se realiza mediante la arquitectura DeepESD (Baño-Medina et al., 2022), la cual integra tres capas convolucionales de 50, 25 y 10 filtros, y una capa densa para mapear los predictores a la resolución de la rejilla del CPM. Se entrenan cuatro modelos univariables para las variables esenciales (CORE) de temperatura y precipitación (tas, tasmax, tasmin y pr), siguiendo los protocolos internacionales de regionalización para CMIP6 (Gutowski et al., 2016). Estos modelos utilizan las funciones de pérdida de Error Cuadrático Medio (MSE) para temperaturas y asimétrica para precipitación, esta última usa de base el MAE, y penaliza adicionalmente las subestimaciones (Doury et al., 2024; González-Abad & Gutiérrez, 2025) para incentivar la obtención de valores más representativos de los eventos extremos.

incentivar la obtención de valores más representativos de los eventos extremos.

RESULTADOS

Se obtuvieron proyecciones aplicando el emulador a cinco GCMs: MPI-ESM1-2-LR, MPI-ESM1-2-HR, MRI-ESM2-0, MIROC6 y CanESM5, además del GCM de referencia vinculado al RCM-CPM de entrenamiento (NorESM2-MM para escenario SSP3-7.0). Para la precipitación, se analizaron series temporales anuales de la media, percentil 98 (P98, días húmedos ≥1mm), Rx1day, R01 y SDII.

En la precipitación (Figura 1), se observa que las medias de las inferencias siguen de cerca la señal de los GCMs; sin embargo, se generan valores sobre el GCM para P98, Rx1day y SDII, e inferiores en frecuencia (R01). Esto es coherente con el valor añadido esperado a escala kilométrica (presencia de procesos convectivos explícitos), aunque el análisis de los estadísticos sobre NorESM2-MM (utilizando el CPM como ground truth) revela una menor destreza en la captura de los valores extremos, debido a la elección de una función de pérdida determinista. La robustez del método se respalda en el caso de soft transferability (NorESM2-MM), donde las trayectorias emuladas siguen a su driving GCM de forma análoga a los escenarios de hard transferability. Sin embargo, este comportamiento también expone la limitación del enfoque frente a los extremos; al contrastar la inferencia sobre NorESM2-MM con su CPM de referencia (ground truth), se evidencia una clara subestimación en los picos de intensidad, confirmando la dificultad del emulador determinista para reproducir fielmente las colas de la distribución incluso en el escenario ideal.

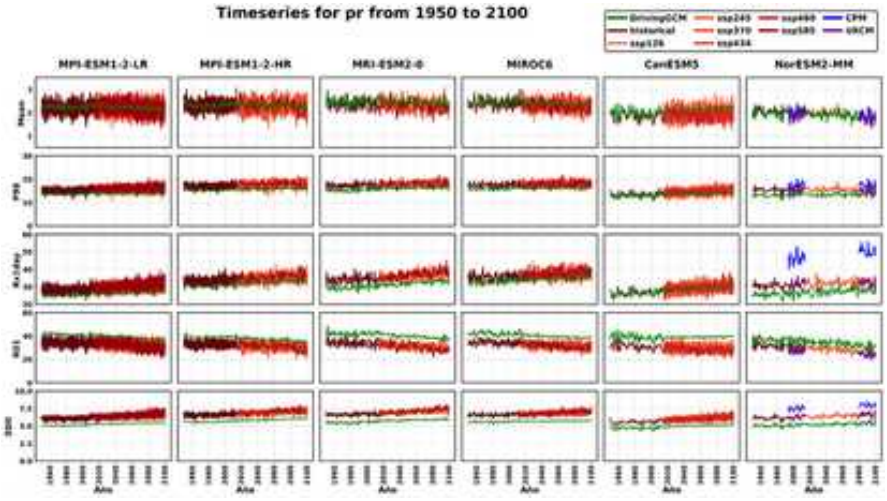


Figura 1. Series temporales de diferentes métricas de precipitación (en filas) emuladas a partir de diferentes GCMs (columnas). Se muestra también la salida directa del GCM y (para NorESM2-MM) la salida directa del CPM y la emulación a partir de predictores del URCM (ver leyenda). Para el driving GCM, se considera la media de todos los escenarios y miembros del ensemble.

DISCUSIÓN

La consistencia del emulador al aplicarse a GCMs no vistos (*hard transferability*) demuestra la robustez de las arquitecturas convolucionales para propagar las señales de cambio climático promedio dictadas por los modelos globales forzantes. Asimismo, el incremento sistemático detectado en índices como P98 o Rx1day respecto a las salidas brutas del GCM confirma que el modelo hereda con éxito la señal de alta resolución espacial del CPM de referencia.

No obstante, la dificultad para capturar con total precisión la intensidad de los eventos extremos puntuales es un comportamiento ampliamente documentado en la regionalización mediante *deep learning*. El uso de funciones de pérdida deterministas y no estocásticas tiende a suavizar la variabilidad de alta frecuencia, y a subestimar la varianza en las colas de la distribución de variables discontinuas como la precipitación (Doury et al., 2023). Esta respuesta técnica ante los extremos climáticos se ha analizado recientemente de manera analítica, demostrando que los métodos basados en el error cuadrático medio (MSE) tienden a sobreestimar la frecuencia de la precipitación (R01), y a subestimar notablemente su intensidad (SDII) para mantener un valor medio sin sesgo (González-Abad & Gutiérrez, 2025). Dentro del espectro determinista, se ha constatado que las funciones de pérdida asimétricas (ASYM) —como la implementada en este trabajo para la precipitación— son las que ofrecen el mejor rendimiento y la menor sensibilidad al entrenamiento frente a métricas extremas como el percentil de control o el Rx1day, mitigando parcialmente la subestimación generalizada de los picos de intensidad (González-Abad & Gutiérrez, 2025).

CONCLUSIONES

Este trabajo constituye uno de los primeros estudios en aplicar *deep learning* para la regionalización estadística de un conjunto masivo y multi-modelo de CMIP6 (6 GCMs, 126 simulaciones y más de 9.400 años de simulación), demostrando el potencial operativo de los emuladores de modelos regionales (RCM) para generar proyecciones a escala kilométrica (~3 km) con un coste computacional reducido. En líneas generales, el emulador reproduce fielmente la señal de cambio climático a largo plazo y aporta el valor añadido esperado en las variables de superficie, ofreciendo soluciones consistentes bajo escenarios de transferencia dura (*hard transferability*).

No obstante, el enfoque actual presenta limitaciones metodológicas intrínsecas. En primer lugar, la capacidad de la herramienta está condicionada por la propagación inevitable de los sesgos de gran escala procedentes de los modelos globales forzantes (*driving GCMs*). En segundo lugar, la naturaleza determinista de la arquitectura tiende a suavizar la variabilidad de alta frecuencia espacial, lo que se traduce en un margen de mejora en la captura de la intensidad de los eventos de precipitación más extremos.

Como trabajo futuro, se plantea profundizar en el análisis detallado de las métricas locales y los patrones espaciales, así como implementar técnicas de ajuste de sesgo (*bias correction*) en entornos operativos reales. Asimismo, el desarrollo de la investigación se orientará hacia la exploración y el diseño de emuladores basados en arquitecturas del estado del arte, tales como *transformers* o modelos de difusión (*diffusion models*), con el objetivo de mejorar la coherencia física de los campos simulados y optimizar la precisión en la representación de los extremos climáticos a escala kilométrica.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es parte del proyecto Horizon Europe Impetus4Change (I4C, número de concesión 101081555).

S. R.-E. ha sido financiado por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) y la Comisión Europea – NextGenerationEU (Reglamento UE 2020/2094), a través de la Plataforma Temática Interdisciplinar Clima (PTI Clima) / Desarrollo de Servicios Climáticos Operativos del CSIC.

REFERENCIAS

Baño-Medina, J., Iturbide, M., Fernández, J., & Gutiérrez, J. M. (2024). Transferability and explainability of deep learning emulators for regional climate model projections: Perspectives for future applications. *Artificial Intelligence for the Earth Systems*, *3*(4). https://doi.org/10.1175/AIES-D-23-0099.1

Baño-Medina, J., Manzanas, R., Cimadevilla, E., Fernández, J., González-Abad, J., Cofiño, A. S., & Gutiérrez, J. M. (2022). Downscaling multi-model climate projection ensembles with deep learning (DeepESD): contribution to CORDEX EUR-44. *Geoscientific Model Development*, *15*(17), 6747–6758. https://doi.org/10.5194/gmd-15-6747-2022

Doury, A., Somot, S., Gadat, S., Ribes, A., & Corre, L. (2023). Regional climate model emulator based on deep learning: Concept and first evaluation of a novel hybrid downscaling approach. *Climate Dynamics*, *60*, 1751–1779. https://doi.org/10.1007/s00382-022-06343-9

Doury, A., Somot, S., & Gadat, S. (2024). On the suitability of a convolutional neural network based RCM-emulator for fine spatio-temporal precipitation. *Climate Dynamics*, *62*, 8587–8613. https://doi.org/10.1007/s00382-024-07350-8

González-Abad, J., & Gutiérrez, J. M. (2025). Are deep learning methods suitable for downscaling global climate projections? An intercomparison for temperature and precipitation over Spain. *Artificial Intelligence for the Earth Systems*, *4*(4). https://doi.org/10.1175/AIES-D-24-0121.1

Gutowski Jr., W. J., Giorgi, F., Timbal, B., Frigon, A., Jacob, D., Kang, H.-S., Raghavan, K., Lee, B., Lennard, C., Nikulin, G., O'Rourke, E., Rixen, M., Solman, S., Stephenson, T., and Tangang, F.(2016). WCRP COordinated Regional Downscaling EXperiment (CORDEX): a diagnostic MIP for CMIP6, Geosci. Model Dev., 9, 4087–4095, https://doi.org/10.5194/gmd-9-4087-2016

Lucas-Picher, P., Argüeso, D., Brisson, E., Tramblay, Y., Berg, P., Lemonsu, A., Kotlarski, S., & Caillaud, C. (2021). Convection-permitting modeling with regional climate models: Latest developments and next steps. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, 12(6), e731. https://doi.org/10.1002/wcc.731

Kendon, E. J., Addison, H., Doury, A., Somot, S., Watson, P. A. G., Booth, B. B. B., Coppola, E., Gutiérrez, J. M., Murphy, J., & Scullion, C. (2025). Potential for Machine Learning Emulators to Augment Regional Climate Simulations in Provision of Local Climate Change Information. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *106*(6), E1175-E1203. https://doi.org/10.1175/BAMS-D-24-0114.1

Kendon, E. J., Ban, N., Roberts, N. M., Fowler, H. J., Roberts, M. J., Chan, S. C., Evans, J. P., Fosser, G., & Wilkinson, J. M. (2017). Do convection-permitting regional climate models improve projections of future precipitation change? *Bulletin of the American Meteorological Society*, *98*(1), 79–93. https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-0004.1

Prein, A. F., Langhans, W., Fosser, G., Ferrone, A., Ban, N., Goergen, K., Keller, M., Tölle, M., Gutjahr, O., Feser, F., Brisson, E., Kollet, S., Schmidli, J., van Lipzig, N. P. M., & Leung, R. (2015). A review on regional convection-permitting climate modeling: Demonstrations, prospects, and challenges. *Reviews of Geophysics*, *53*(2), 323–361. https://doi.org/10.1002/2014RG000475

Teichmann, C., Soret, A., Duzenli, E., Gamon, J. R., Boé, J., Moine, M.-P., Doury, A., Alias, A., Lemonsu, A., Caillaud, C., Somot, S., Fernandez, J., Gutierrez, J. M., Milovac, J., Halenka, T., Boberg, F., Christensen, O. B., Yang, S., Coppola, E., … Sorteberg, A. (2023). *D3.2 - Experimental protocol for the new CPRCM I4C simulations and lists of the planned runs*. Impetus4Change(I4C). https://impetus4change.eu/wp-content/uploads/2024/01/I4C-Del-3.2-Experimental-Protocol-for-CPRCM-Simulations-Lists.pdf

MODELLING SEAWATER PCO_2 IN THE CANARY ISLANDS REGION BASED ON SATELLITE MEASUREMENTS AND MACHINE LEARNING TECHNIQUES

Irene SÁNCHEZ-MENDOZA, Melchor GONZÁLEZ-DÁVILA, David GONZÁLEZ-SANTANA, David CURBELO-HERNÁNDEZ, David ESTUPIÑÁN-SANTANA, Aridane G. GONZÁLEZ and J. Magdalena SANTANA-CASIANO.

[1] *Instituto de Oceanografía y Cambio Global, QUIMA, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, 35017 Las Palmas de Gran Canaria, Spain.*

irene.sanchez@ulpgc.es melchor.gonzalez@ulpgc.es, david.gonzalezsantana@ulpgc.es, david.curbelo@ulpgc.es, davidestupinansantana@hotmail.es, aridane.gonzalez@ulpgc.es, magdalena.santana@ulpgc.es

RESUMEN

Los avances recientes en teledetección y aprendizaje automático han mejorado la capacidad para monitorizar el intercambio aire-mar de CO2. El objetivo de este estudio fue desarrollar y validar un algoritmo de aprendizaje automático para estimar la presión parcial de CO2 en agua de mar (pCO2,sw) y los flujos de CO2 (FCO2) en la cuenca canaria (Atlántico NE), utilizando variables ambientales satelitales y una serie temporal de alta resolución. El conjunto de datos incluyó medidas continuas recogidas entre 2019 y 2024 por dos líneas VOS, y dos boyas fondeadas. Las observaciones siguieron protocolos internacionales de control de calidad. Además, se tomaron muestras discretas trimestrales de alcalinidad total y carbono inorgánico disuelto para cuantificar y corregir desviaciones entre sensores y estimaciones calculadas de pCO2,sw. Se evaluaron tres métodos de aprendizaje automático: bagging, redes neuronales y CatBoost. El modelo bagging mostró el mejor rendimiento, con un RMSE de 2.0 µatm y un R2 > 0.99. Los resultados indican un aumento interanual significativo de pCO2,sw de 3.51 ± 0.31 µatm año-1 entre 2019 y 2024. Además, la cuenca canaria pasó de ser una fuente débil de CO2 en 2019 a una fuente más intensa en 2024, destacando la rápida evolución del ciclo regional del carbono.

Palabras clave: pCO2,sw, modelización, aprendizaje automático, cuenca canaria.

ABSTRACT

Recent advances in remote sensing and machine learning have improved the capacity to monitor air-sea CO2 exchange. The objective of this study was to develop and

validate a machine-learning algorithm to estimate the partial pressure of CO2 in seawater (pCO2,sw) and CO2 fluxes (FCO2) in the Canary basin (NE Atlantic), using satellite environmental variables and a high-resolution time series. The dataset included continuous measurements collected between 2019 and 2024 by two VOS lines and two moored buoys. The observations followed international quality-control protocols. In addition, quarterly discrete samples of total alkalinity and dissolved inorganic carbon were collected to quantify and correct deviations between sensors and calculated estimates of pCO2,sw. Three machine-learning methods were evaluated: bagging, neural networks, and CatBoost. The bagging model showed the best performance, with an RMSE of 2.0 µatm and an R2 > 0.99. The results indicate a significant interannual increase in pCO2,sw of 3.51 ± 0.31 µatm year-1 between 2019 and 2024. In addition, the Canary basin shifted from being a weak source of CO2 in 2019 to a stronger source in 2024, highlighting the rapid evolution of the regional carbon cycle.

Keywords: pCO2,sw, modelling, machine-learning, Canary basin.

INTRODUCTION

Las emisiones de CO2 antropogénico han provocado un fuerte aumento de las concentraciones atmosféricas de este gas traza. Se considera que el océano Atlántico es uno d los principales sumideros oceánicos de CO2, absorbiendo aproximadamente el 25% de CO2 antropogénico (Gurber et al. 2022). Las investigaciones recientes han hecho hincapié en cuantificar la absorción de CO2 por parte de los océanos (p. ej. Gregor et al., 2024). Un enfoque habitual consiste en utilizar modelos de regresión para estimar la presión parcial de CO2 (pCO2,sw) a partir de variables ambientales, aunque a menudo, no logran captar la complejidad en regiones dinámicas (Sun et al., 2021).

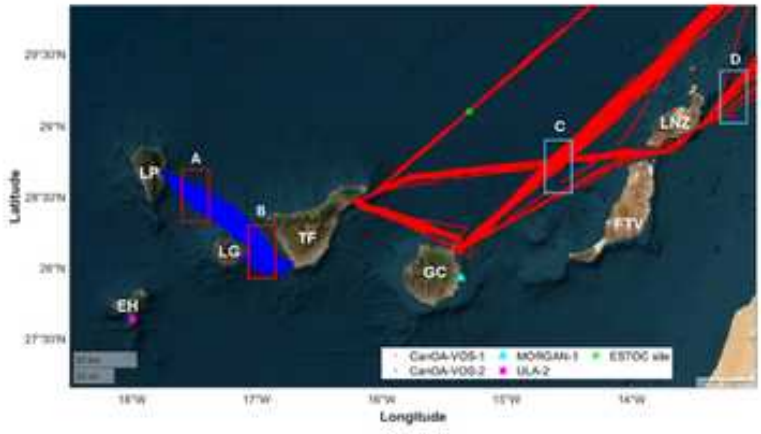
Este estudio se centra en la región canaria (27.0–30°N; 13.0–19°W). Esta región se ve influenciada por la corriente de Canarias y los vientos alisios, que provocan remolinos de mesoescala. Dicha región se ve influenciada también por los filamentos de afloramiento procedentes del noroeste de África, provocando un aumento de la productividad primaria, a pesar de sus bajas concentraciones de clorofila a (Davenport et al., 1999). Además, esta región ha sido afectada por las olas de calor marinas, provocando que 2023 fuera el año más cálido de las Islas Canarias desde 1982, afectando la dinámica del CO2 (Varela et al., 2024) y revelando, por tanto, un aumento constante del pCO2 en superficie en esta región.

El objetivo de este estudio fue desarrollar y validar un algoritmo de aprendizaje automático que permita estimar el pCO2,sw y el flujo de CO2 (FCO2) en la región canaria usando variables satelitales de alta resolución y una serie temporal de

observaciones in situ de pCO2,sw.

METHODS

La base de datos *in situ* se construyó usando los datos medidos de las plataformas de observación de la superficie oceánica instaladas en los buques de observación voluntaria (VOS) y las boyas oceanográficas (*Fig. 1*). Los VOS recopilan datos de forma continua a lo largo de sus rutas habituales: CanOA-VOS-1, a bordo del Jona Sophie, cubre las islas orientales entre Tenerife, Gran Canaria y Lanzarote, mientras que, CanOA-VOS-2, cubre las islas occidentales entre Tenerife, La Gomera y La Palma. En cuanto a las boyas oceanográficas, estas registran datos de superficie: MORGAN-1, ubicada en Grando, Gran Canaria, y ULA-2, ubicada en El Hierro.



La presión parcial de CO2 en agua de mar (pCO2,sw) se calculó a partir de xCO2 y se ajustó a la temperatura superficial del mar (SST), computándose posteriormente la fugacidad (fCO2) a partir del pCO2,sw (Dickson et al., 2007). Para el cálculo de FCO2, se comparó inicialmente el xCO2 atmosférico (xCO2,atm) medido a bordo con los registros del Observatorio Atmosférico de Izaña en Tenerife (AEMET, 2024), adoptando los datos de Izaña para el estudio y convirtiendo el xCO2,atm a pCO2,atm para el cálculo del FCO2.

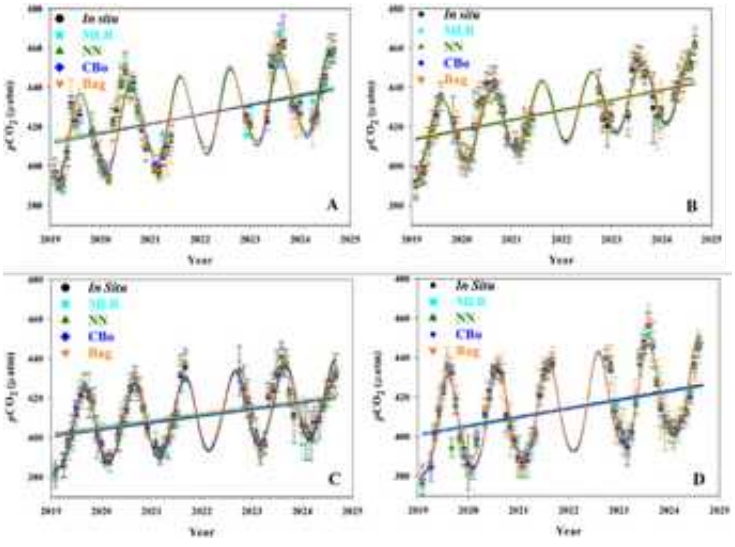
Para el desarrollo de los modelos de predicción para determinar pCO2,sw, se usaron datos de temperatura superficial del mar (SST), clorofila a (Chl-a) y profundidad de capa de mezcla (MLD), obtenidos de Copernicus Marine Enviromental Monitoring Service (CMEMS, https://marine.copernicus.eu/access-data, último acceso: 27 May 2025); posteriormente, se incorporó la velocidad del viento para el calculo de FCO2. Todas las variables se procesaron y se ajustaron en el tiempo y el espacio a los registros observacionales, y se utilizaron medias diarias para la calibración y validación del modelo.

Se usaron y desarrollaron cuatro modelos de aprendizaje automático: neural network (NN; Wang, 2003), categorical boosting (CatBoost; Dorogush et al., 2018, Prokhorenkova et al., 2018; Qian et al., 2023) y bootstrap aggregation (bagging; Breiman, 1996) y el modelo más sencillo, una regresión lineal múltiple (MLR). Los rendimientos de todos los modelos fueron evaluados usando el conjunto de datos de validación mediante el coeficiente de determinación, el error cuadrático medio, el error absoluto medio y la suma diaria de los errores al cuadrado (R2, RMSE; MAE y SSE, respectivamente).

RESULTS

Todos los modelos de predicción se utilizaron para reconstruir la media mensual de pCO2,sw en las áreas A-D y se compararon los resultados entre ellos (Fig. 2). Todos los modelos consiguen reproducir con éxito el ciclo estacional del pCO2,sw, mostrando que este alcanza su máximo en los meses de verano y su mínimo en los meses de invierno. Las predicciones mostraron diferencias menores, pero no significativas estadísticamente ($p > 0.05$).

En el área A y B, el pCO2,sw varia estacionalmente entre 404 ± 18 µatm y 449 ± 19 µatm con amplitudes estacionales de 47 ± 8 µatm, mientras que en el área C y D, los valores estacionales oscilan entre 390 ± 15 µatm y 440 ± 16 µatm con amplitudes de 52 ± 7 µatm, detectando, por tanto, diferencias estadísticas al comparar los sectores occidentales y orientales.



En cuanto a los modelos de predicción, se probaron cinco configuraciones de modelo, utilizando diferentes combinaciones de los predictores (SST, Chl a, MLD y pCO2,atm). El modelo más sencillo, MLR, sugiere que el MLR con mejor rendimiento incluye todos los parámetros (pCO2,atm + SST + MLD + Chl-a), alcanzando valores R2 = 0.904, RMSE = 4.9 µatm, MAE = 4.1 µatm d-1 y SSE = 5.4 µatm2 d-1.

El primer modelo de aprendizaje automático (NN) mostró el mayor rendimiento en el modelo de cuatro variables, donde los modelos de dos variables tuvieron un rendimiento solo ligeramente inferior. Para el conjunto de datos de entrenamiento, el R2, RMSE, MAE y SSE fueron de 0.891, 7.1 µatm, 5 µatm d-1 y 16 µatm2 d-1, respectivamente. Al igual que el primer modelo, el segundo modelo (CatBoost) muestra que la configuración SST + Chl-a + MLD + pCO2,atm tiene los mejores resultados, mostrando un RMSE, MAE y SSE más bajos, y un R2 más alto (3.6 µatm, 2.4 µatm d-1, 3.0 µatm2 d-1 y 0.95, respectivamente). El mejor modelo de aprendizaje automático fue bagging, mostrando la mayor capacidad predictiva con los modelos que consideraban tres o cuatro parámetros, arrojando valores más bajos de RMSE, MAE y SSE, y proporcionando un R2 más alto (RMSE =2.0 µatm, MAE = 1.6 µatm d-1 y SSE = 0.8 µatm2 d-1 y R2 = 0.991, respectivamente). Al comparar las predicciones de bagging con los datos in situ, no se encontraron diferencias significativas, confirmando que bagging proporciona la representación más precisa de los valores medidos. En términos generales, los valores in situ fueron ligeramente superiores a los predichos, con diferencias de 1.7 ± 1.8 µatm para el pCO2,sw.

DISCUSSION

Se usaron datos satelitales para predecir el pCO2 en agua de mar. De los cuatro modelos de aprendizaje automático, NN mostró un mayor error, mientras que el modelo MLR funcionó ligeramente mejor. En cambio, el algoritmo CatBoost estimó el pCO2,sw con incertidumbres por debajo de 4 µatm y R2 > 0.93. Sin embargo, el enfoque bagging exhibió un rendimiento superior a los demás, arrojando incertidumbres de 2 µatm durante el periodo 2019-2024. Cabe destacar que todos los modelos muestran su mejor versión usando el modelo compuesto por las cuatro variables (SST + Chl-a + MLD + pCO2,atm), sin embargo, en los cuatro casos, los modelos que utilizaron únicamente SST mostraron altos coeficientes de correlación (0.65 > R2 > 0.94). Aunque no es la configuración con mejor rendimiento, este modelo de una sola variable afirma que las aguas de las Islas Canarias están dominadas en gran medida por efectos térmicos dominando sobre el pCO2 superficial (González-Davila and Santana-Casiano, 2023). No obstante, el modelo mejora al incorporar la Chl-a y MLD, reflejando la influencia de los procesos biológicos y físicos (producción primaria, remineralización y mezcla de masas de agua).

En las áreas de estudio, tanto los datos observacionales como las predicciones del modelo indican que la pCO2,sw aumentó a una tasa de 3.8 ± 0.6 µatm año-1 entre 2019 y 2024. Para la cuenca canaria, el enfoque bagging muestra una media de 419 ± 16 µatm de pCO2,sw, con una amplitud estacional de 55 µatm. En cuanto a la tendencia, la serie temporal muestra un crecimiento de 3.51 ± 0.31 µatm año-1 durante el periodo de estudio, superando el aumento del pCO2,atm, que actualmente es de 2.3 µatm año-1. Estas tasas son superiores a los análisis previos en ESTOC para 1995-2023 (González-Dávila and Santana-Casiano, 2023), que indicaban un aumento de 2.1 µatm año-1. No obstante, estas tasas resultan comparables cuando se restringe el análisis al periodo 2019-2023, excluyendo las condiciones anómalas observadas a finales de 2023.

Gracias a la similitud entre las observaciones *in situ* y los datos predichos por bagging, se pudieron construir mapas mensuales de pCO2,sw en la región canaria. Se produjo el patrón estacional esperado, con un pCO2,sw más alto en septiembre y más bajo en marzo. Se observó un claro gradiente longitudinal, con valores mayores en la región oriental y menores en la occidental, impulsado principalmente por el efecto térmico; el agua de mar más fría se encuentra en el este, junto con la influencia de las aguas del afloramiento africano ricas en nutrientes (Pelegrí et al., 2005). El modelo deja de manifiesto varias características oceanográficas evidentes: los filamentos de afloramiento (más manifiestos en junio y septiembre) reducen localmente el pCO2,sw debido a sus bajas temperaturas, mientras que las zonas de estela de las islas exhiben aguas más cálidas, conduciendo a un aumento del pCO2,sw.

Se resalta también la influencia de los eventos de olas de calor marinas, particularmente durante el verano de 2023, sobre la variabilidad del pCO2,sw. El aumento de pCO2,atm se acompaña de un incremento de la SST de 0.2 ºC yr-1 sobre los seis años, equivalente a un calentamiento acumulado de 1.2 ºC yr-1 entre 2019 y 2024. Estas condiciones han contribuido a tendencias recientes más altas de pCO2,sw y acidificación oceánica en comparación con las estimaciones a largo plazo en ESTOC, que fueron de 2.1 µatm año-1, para el periodo de 1995 a principios de 2023 (González-Dávila and Santana-Casiano, 2023). Notablemente, antes de 2023 no se habían registrado en el sitio ESTOC inviernos con SST superior a 19 ºC ni veranos con SST por encima de 25 ºC, marcando un cambio significativo en el régimen térmico de la región.

CONCLUSIONS

Este estudio presenta el primer marco de modelización predictiva para el pCO2,sw en la región canaria. Mediante la combinación de productos satelitales con observaciones *in situ* (buques voluntarios y boyas fondeadas), fue posible caracterizar la variabilidad del sistema de carbono. Se aplicaron cuatro enfoques de modelización utilizando como variables de control de pCO2,atm, SST, Chl a y MLD.

Los modelos de MLR, NN y CatBoost mostraron resultados comparables a las aplicaciones de escala oceánica. Sin embargo, el modelo bagging proporcionó el mejor rendimiento, con valores de RMSE de 2.0 µatm, y un R2 superior a 0.99 para pCO2,sw, y sin diferencias significativas respecto a las medias mensuales observadas.

Los resultados subrayan la complejidad de modelar estos parámetros en entornos influenciados por islas, donde la variabilidad física y biológica es mayor que en el océano abierto. La influencia de la ola de calor marina de 2023, que persistió más de un año, resalta la sensibilidad de las series temporales cortas ante eventos extremos. Aunque el rendimiento del modelo es robusto, se requieren series temporales más largas para restringir mejor los cambios a largo plazo en las aguas de las Islas Canarias.

ACKNOWLEDGMENTS

Agradecemos al propietario del JONA SOPHIE, Reederei Stefan Patjens GmbH & Co. KG, así como a NISA Marítima, a los capitanes y a los miembros de la tripulación por su apoyo durante esta colaboración. También agradecemos a la compañía naviera FRED OLSEN EXPRESS y a sus capitanes y tripulaciones por su asistencia en todas las operaciones. Se extiende un agradecimiento especial al técnico Adrián Castro-Álamo por el mantenimiento quincenal del equipo y el muestreo discreto de la alcalinidad total a bordo del buque.

La línea SOOP CanOA-VOS forma parte de la contribución española al Sistema Integrado de Observación del Carbono (ICOS ERIC; https://www.icos-cp.eu/, último acceso: 22 de enero de 2026) desde 2021 y ha sido reconocida como una Estación Oceánica de Clase 1 de ICOS. D. C.-H. contó con el apoyo de la beca de doctorado PIFULPGC-2020-2 ARTHUM-2. Este trabajo también recibió financiación del proyecto PLANCLIMAC2 (1/MAC/2/2.4/0006) bajo el Programa de Cooperación Territorial Interreg VI Madeira-Azores-Canarias (MAC) 2021-2027, cofinanciado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER).

REFERENCES

AEMET: Centro de Investigación Atmosférica de Izaña, Medidas de CO2, https://gml.noaa.gov/aftp/data/trace_gases/co2/flask/ surface/txt/co2_izo_surface-flask_1_ccgg_event.txt (last access: 26 May 2025), 2024.

Breiman, L.: Bagging predictors, Mach. Learn., 24, 123–140, https://doi.org/10.1007/BF00058655, 1996.

Davenport, R., Neuer, S., Hernandez-Guerra, A., Rueda, M. J., Llinas, O., Fischer, G., and Wefer, G.: Seasonal and in terannual pigment concentration in the Canary Islands re gion from CZCS data and comparison with observations from the ESTOC, Int. J. Remote Sens., 20, 1419–1433, https://doi.org/10.1080/014311699212803, 1999.

Dickson, A. G., Sabine, C. L., and Christian, J. R. (Eds.): Guide to best practices for ocean CO2 measurement. Sid ney, British Columbia, North Pacific Marine Science Organiza tion, PICES Special Publication 3, IOCCP Report 8, 191 pp., https://doi.org/10.25607/OBP-1342, 2007.

Dorogush, A. V., Ershov, V., and Gulin, A.: CatBoost: gradient boosting with categorical features support, ArXiv [preprint], https://doi.org/10.48550/arXiv.1810.11363, 2018.

González-Dávila, M. and Santana-Casiano, J. M.: Long term trends of pH and inorganic carbon in the Eastern North Atlantic: the ESTOC site, Front. Mar. Sci., 10, https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1236214, 2023.

Gregor, L., Shutler, J., and Gruber, N.: High-Resolution Variabil ity of the Ocean Carbon Sink, Glob. Biogeochem. Cy., 38, https://doi.org/10.1029/2024GB008127, 2024.

Gruber, N., Keeling, C. D., and Bates, N. R.: Interannual variabil ity in the North Atlantic ocean carbon sink, Science, 298, 2374 2378, https://doi.org/10.1126/science.1077077, 2002.

Pelegrí, J. L., Arístegui, J., Cana, L., González-Dávila, M., Hernández-Guerra, A., Hernández-León, S., Marrero-Díaz, A., Montero, M. F., Sangrá, P., and Santana-Casiano, M.: Cou pling between the open ocean and the coastal upwelling region off northwest Africa: water recirculation and off shore pumping of organic matter, J. Mar. Syst., 54 (1–4), https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2004.07.003, 2005.

Prokhorenkova, L., Gusev, G., Vorobev, A., Dorogush, A. V., and Gulin, A.: CatBoost: unbiased boosting with categorical features, https://doi.org/10.5194/os-22-609-2026 32nd Conference on Neural Information Processing Systems (NeurIPS 2018), Montréal, Canada, https://github.com/catboost/ catboost (last access: 23 January 2026), 2018.

Qian, L., Chen, Z., Huang, Y., and Stanford, R. J.: Employing categorical boosting (CatBoost) and meta-heuristic algorithms for predicting the urban gas consumption, Urban Climate, 51, https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101647, 2023.

Sun, H., He, Y., Chen., Y., and Zhao, B.: Space-Time Sea Surface pCO2 estimation in the North Atlantic based on CatBoost, Re mote Sens., 13, 2805, https://doi.org/10.3390/rs13142805, 2021.

Varela, R., de Castro, M., Costoya, X., Días, J. M., and Gómez-Gesteira, M.: Influence of the cnary upwelling system on SST during the unprecedented 2023 North Atlantic marine heatwave, Sci. Total Environ., 949, 175043, https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175043, 2024.

Wang, S.-C.: Artificial Neural Network BT– Interdisciplinary Computing in Java Programming, edited by: Wang, S.-C., Springer US, Boston, MA, 81–100, https://doi.org/10.1007/978 1-4615-0377-4_5, 2003.

AN OVERVIEW OF CLIMATE VARIABILITY IN IZAÑA OBSERVATORY: AIR TEMPERATURE, PRECIPITATION, SUNSHINE DURATION, RELATIVE HUMIDITY AND PRESSURE DURING THE 1916-2025 PERIOD

Rosa D. GARCÍA[1,2], Juan José. BUSTOS[2], Omaira GARCÍA[2], Carlos TORRES[2], Ramón RAMOS[2], Carlos MARRERO[2], Concepción BAYO[2], Virgilio CARREÑO[2], Cándida HERNÁNDEZ[2], Belén QUEROL[2] and Irene TOVAR[2]

[1]TRAGSATEC, Madrid, España
[2]Izaña Atmospheric Research Center (IARC), State Meteorological Agency (AEMET), Santa Cruz de Tenerife, Spain

rgarci47@tragsa.es,jbustoss@aemet.es, ogarciar@aemet.es, ctorresg@aemet.es, rramosl@aemet.es, cmarrerod@aemet.es, cbayop@aemet.es, chernandezh@aemet.es, bquerolc@aemet.es, itovarh@aemet.es

RESUMEN

El Observatorio de Izaña (IZO), situado en Tenerife (Islas Canarias, España) a 2400 m de altitud, pertenece al Centro de Investigación Atmosférica de Izaña (AEMET). Su localización, generalmente por encima de la capa de inversión térmica y bajo un régimen de subsidencia subtropical, proporciona condiciones atmosféricas muy estables, representativas de la troposfera libre, lo que lo convierte en un emplazamiento clave para el estudio de la composición atmosférica de fondo y del transporte de largo alcance en el Atlántico Norte subtropical. El observatorio cuenta con una larga trayectoria científica y, en 2026, alcanza 110 años de observaciones meteorológicas ininterrumpidas. Reconocido en 2017 como estación centenaria por la Organización Meteorológica Mundial (OMM), sus registros destacan por su calidad y continuidad. Actualmente, dispone de instrumentación avanzada y participa en redes internacionales. En este trabajo se analizan tendencias, valores climatológicos normales y extremos de temperatura, insolación, presión y precipitación a escala anual para el periodo 1916–2025.

Palabras clave: series climáticas largas, cambio climático, variabilidad climática, Observatorio de Izaña

ABSTRACT

The Izaña Observatory (IZO), located on Tenerife (Canary Islands, Spain) at 2400 m above sea level, belongs to the Izaña Atmospheric Research Centre (AEMET). Its location, typically above the trade-wind temperature inversion layer and under a subtropical subsidence regime, provides very stable atmospheric conditions

representative of the free troposphere, making it a key site for studying background atmospheric composition and long-range transport processes over the subtropical North Atlantic. The observatory has a long scientific tradition and, in 2026, marks 110 years of uninterrupted meteorological observations. Recognised in reaches 2017 as a Centennial Observing Station by the World Meteorological Organization (WMO), its records are noted for their quality and continuity. The observatory is currently equipped with advanced instrumentation and participates in several international networks. This study analyses long-term trends, climatological normal values, and extremes of air temperature, sunshine duration, pressure, and precipitation at annual scale for the period 1916–2025.

Key words: long-term climate series, climate change, climate variability, Izaña Observatory.

INTRODUCTION

Long-term meteorological observations are essential for detecting climate trends and understanding climate variability (IPCC, 2023). Instrumental records spanning more than a century provide a robust basis for analysing long-term changes in atmospheric conditions and evaluating the influence of global climate change. High-elevation observatories play a particularly important role in this context, as they frequently operate above the planetary boundary layer and therefore provide measurements representative of large-scale atmospheric conditions. In subtropical regions, these sites allow the monitoring of the free troposphere and long-range transport processes.

The Izaña Observatory (IZO), located on Tenerife in the Canary Islands (Spain), is one of the most important atmospheric research stations in the subtropical North Atlantic. Situated at approximately 2400 m above sea level, the observatory often lies above the marine boundary layer and the trade-wind temperature inversion. These conditions provide stable atmospheric environments with limited local influence (Torres et al., 2026).

METHODS

In this study, annual time series of the main meteorological variables measured at the Izaña Observatory during the period 1916–2025 are analysed: mean air temperature, total precipitation, sunshine duration, and atmospheric pressure. The datasets are derived from the observatory's instrumental records and have undergone quality control procedures (Table 1).

Variable	Start date	Instruments	Data Frecuency
Temperature	Jan 1916	THIES CLIMA 1.1005.54.700 3 VAISALA HMP45C (in parallel) VAISALA PTU300 THIES CLIMA (thermo-hygrograph) CAMPBELL SCIENTIFIC CS215 (Tower top)	1' 1' 1' Continuous 1'
Precipitation	Jan 1916	THIES CLIMA Tipping Bucket THIES CLIMA Tipping Bucket Hellman rain gauge Hellman pluviograph	1' 1' Daily Continuous
Sunhine Duration	Aug 1916	KIPP & ZONEN CSD3 Campbell Stokes Sunshine recorder	10' Continuous
Pressure	Jan 1916	SETRA 470 VAISALA PTU 300 BELFORT 5/800AM/1 (Barograph) SETRA 470 (Tower top)	1' 1' Continuous 1'

Table 1: Summary of meteorological variables monitored at the Izaña Observatory, including start dates, instrumentation used, and temporal resolution of the measurements.

RESULTS

The annual mean air temperature at IZO shows a statistically robust warming trend over 1916–2025, with an increase of approximately 0.17 °C decade-1, equivalent to about 1.8°C since the early twentieth century, consistent with global warming (Figure 1a). During the first decades (1916–1950), values were mostly below the present climatological mean, whereas from the 1980s onwards a sustained increase is observed, with a higher frequency of warm and very warm years. The highest values are recorded in the last two decades. This series is particularly relevant as the high-elevation site is representative of quasi free-tropospheric conditions. Notably, 2023 (11.2°C) and 2024 (12.1°C) exceeded the upper quintile of the 1961–1990 reference period and were classified as extremely warm, with 2024 being the highest annual mean temperature recorded since 1916.

Total precipitation at IZO exhibits marked interannual variability over 1916–2025, with very wet years (>1000 mm) alternating with markedly dry years, reflecting the episodic nature of precipitation in this subtropical mountain environment (Figure 1b). The smoothed series reveals multi-decadal fluctuations, with wetter conditions in the mid-20th century and during the 1970s–1980s, and a higher frequency of dry and very dry years in recent decades, although occasional wet years still occur. Despite this

variability, no clear long-term trend is identified. This behaviour is consistent with the dominant influence of large-scale atmospheric circulation and synoptic-scale processes controlling precipitation in the subtropical North Atlantic.

Sunshine duration at IZO shows a clear and significant increasing trend over 1916–2025, with an estimated rise of about 43 h decade-1, indicating a substantial increase in surface solar radiation (Figure 1c). Despite evident interannual variability, the smoothed series highlights a gradual upward evolution, particularly from the late twentieth century onwards, with the highest values observed in recent decades. This sustained increase may be linked to changes in atmospheric transparency, cloud cover or aerosol concentrations, although further analysis is required to quantify their relative contributions. In recent years, sunshine duration has reached exceptionally high values, with 3808.9 and 3883.6 h in 2023 and 2024, respectively.

The annual mean atmospheric pressure (Figure 1d) shows relatively small variability over the study period, although a slight increase is observed in the last decade. The values for 2023 and 2024 are similar, at 771.2 and 771.1 hPa, respectively.

Significant relationships were identified among the meteorological variables. Annual mean temperature was positively correlated with sunshine duration (Pearson correlation (R) = 0.682, p_val < 0.001) and negatively correlated with total precipitation (R = −0.403, p_val < 0.001). Likewise, sunshine duration and precipitation exhibited a significant inverse relationship (R = −0.269, p_val = 0.0047). These correlations indicate that years with greater sunshine duration tend to be warmer and drier, whereas wetter years are generally associated with lower temperatures and reduced sunshine duration. Together, these relationships suggest a consistent pattern of climate variability at IZO throughout the study period.

The observed variability may also be influenced by large-scale circulation patterns affecting the North Atlantic, particularly the North Atlantic Oscillation (NAO), which has been shown to exert a strong influence on precipitation variability in the Canary Islands. Furthermore, changes in subtropical subsidence and atmospheric stability associated with a warming climate may contribute to the observed increase in temperature and sunshine duration (García-Herrera et al., 2001; Sánchez-Benítez et al., 2017; Martin-Esquivel et al., 2020).

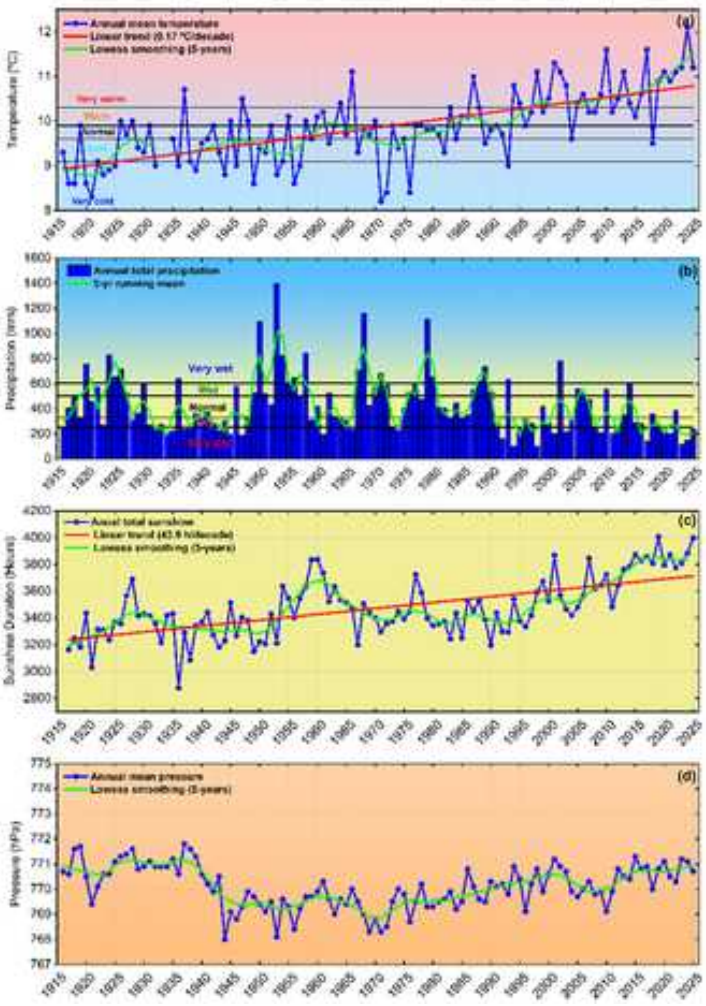


Figure 1. Time series of (a) annual mean temperature, (b) total annual precipitation, (c) annual sunshine duration and (d) annual mean pressure at Izaña Observatory between 1916 and 2025.

CONCLUSIONS

The centennial records from the Izaña Observatory provide a unique dataset for assessing climate variability in the subtropical North Atlantic under quasi free-tropospheric conditions. The results show a clear warming trend in temperature and a significant increase in sunshine duration, while precipitation exhibits strong variability with no clear long-term trend and pressure shows only minor changes. These findings highlight the importance of long-term high-elevation observations for understanding climate variability and change.

ACKNOWLEDGMENTS

This work is dedicated to the memory of Dr. Emilio Cuevas Agulló, who recently passed away and served as Director of the Izaña Observatory for more than four decades (1980–2023). His visionary leadership and unwavering commitment to scientific excellence were instrumental in establishing the observatory as a leading international reference site for atmospheric monitoring. Dr. Cuevas was a tireless advocate for the preservation, continuity, and quality of the centennial meteorological series at Izaña, fully recognising their unique value for the study of climate variability and climate change. His work was also pivotal in strengthening the observatory's participation in international networks and advancing research programmes in atmospheric composition and global change. His scientific, institutional, and human legacy will endure as a fundamental contribution to atmospheric science.

REFERENCES

Cropper, T. E., and Hanna, E. An analysis of the climate of Macaronesia, 1865–2012. International Journal of Climatology, 34(3), 604-622, https://doi.org/10.1002/joc.3710, 2014.

Martín-Esquivel, J. L., Marrero-Gómez, M., Cubas, J., González-Mancebo, J. M., Olano, J. M., and del Arco, M. Climate warming and introduced herbivores disrupt alpine plant community of an oceanic island (Tenerife, Canary Islands). Plant Ecology, 221(11), 1117-1131, https://doi.org/10.1007/s11258-020-01066-5, 2020.

Herrera, R. G., Puyol, D. G., MartÍn, E. H., Presa, L. G., and Rodríguez, P. R. Influence of the North Atlantic oscillation on the Canary Islands precipitation. Journal of Climate, 14(19), 3889-3903, https://doi.org/10.1175/1520-0442(2001)014<3889:IOTNAO>2.0.CO;2,2001.

IPCC: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, Switzerland, edited by Core Writing Team; Lee, H. and Romero, J. (eds.), https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.

Torres, C. J., Milford, C., Barreto, Á., Bustos, J. J., García, O. E., García, R. D., Marrero, C., Prats, N., Ramos, R., Redondas, A., Reyes, E., Rivas-Soriano, P. P., Romero-Campos, P. M., Trasobares, I., Schneider, M., Yela, M., Belmonte, J., Almansa, F., López-Solano, C., Werner, E., Rodríguez, S., Alcántara, A., Álvarez-Hernández, A., Álvarez, O., Bayo, C., Berjón, A., Borges, A., Cabello, I., Carreño, V., Castro, N. J., Chinea, N., Cruz, A. M., Damas, M., González, P., González, Y., Guerola, J., Hernández, C., Hernández, J., León-Luís, S. F., López-Fernández, R., López-Solano, J., Mármol, I., Martín, J. I., Martín, T., Naranjo, A., Parra, F., Querol, B., Rey, C., Rodríguez-Valido, M., Santana, D., Santo-Tomás, F., Sepúlveda, E., Serrano, A., Taquet, N.L. and Tovar, I.: Izaña Atmospheric Research Center Activity Report 2023–2024. (Eds. Torres, C. J., Milford, C. and Basart, S.), State Meteorological Agency (AEMET), Madrid, Spain and World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, NIPO: 666-26-001-0, GAW Report No. 322, https://doi.org/10.31978/666-26-001-0, 2026.

STATISTICAL ANALYSIS OF SEA BREEZE OVER COMPLEX TERRAIN WITH THE MESO-NH MODEL AND CERRA REANALYSIS

Alex SERRA[1,2], Aina MAIMÓ-FAR[3], Maria Antònia JIMÉNEZ[2]

[1] *Applied Physics Department, Marine and Environmental Sciences Faculty, INMAR, CEIMAR, University of Cádiz, Spain*
[2] *Universitat de les Illes Balears, Spain*
[3] *School of Mathematics and Statistics, University College Dublin, Ireland*

alex.serra@uib.cat, aina.maimofar@ucd.ie, mantonia.jimenez@uib.cat

ABSTRACT

The characteristics of sea breeze (SB) depend primarily on the land–sea temperature difference, while coastline geometry, synoptical wind and terrain complexity further modulate its development. In regions with heterogeneous surfaces, these factors influence inland penetration and favour interactions with other circulations. Studying SB behaviour typically relies on observations or mesoscale model outputs, but complex environments often require resolutions close to 1km or finer to adequately capture surface variability.

This work analyses SB over Mallorca using the CERRA reanalysis (1984–2024). First, its ability to represent SB at high spatial resolution is evaluated: CERRA reproduces the main features of SB, showing good agreement with a very highresolution MesoNH simulation performed during a representative SB episode. The reanalysis captures the progression of the SB fronts across the island's main basins and the associated inland convergence in its centre.

Using the complete CERRA period, the analysis quantifies the spatiotemporal scales of SB in Mallorca and examines the interaction between fronts and the organization of the central convergence zone. The results provide a consistent picture of the typical timing, extent and variability of the circulation.

Keywords: Sea breeze, Complex terrain, Meso-NH model, CERRA reanalysis, Convection, Convergence zone.

INTRODUCTION

The dimensions of Mallorca (about 100km in length and width) and its topography make it an interesting SB laboratory, considering this wind regime is present almost in half of its summer days (Grau et al., 2021). The SB fronts are partially blocked by the island northern (Serra de Tramuntana) and southern (Serra de Llevant) mountain ranges and end up penetrating the island through its main basins, located at the southwest (Palma basin), southeast (Campos basin) and the northeast (Alcúdia basin). In the centre of the island, the SB fronts generated in the basins converge, often leading to convective activity during clear summer days whenever moisture conditions are met at the ground and higher levels.

Recent advances in reanalysis databases and model resolutions allow a new possibility for studying this regime without the constraints of site-specific measurement or favourable sampling conditions. CERRA (Copernicus European Regional Reanalysis) combines a HARMONIE-ALADIN core with data assimilation to offer 5.5 km and 3-hourly spatial and temporal resolutions. This resolution has been proven to be enough to represent the main SB features in the Palma basin (Serra et al., 2026). The goal of this study is to first check the SB convergence representation in the CERRA data and then statistically analyse their features linking it to high-level turbulence in the complex terrain island of Mallorca.

METHODS

A six-day numerical simulation (12 to 18 July 2022) has been carried out using the Meso-NH 5.7 model (Lac et al., 2018). Three nested domains (5 km, 1 km and 250 m) have been used with initial and boundary conditions from the ECMWF analysis every 6 hours, and with 85 stretched vertical levels. A similar setup is used in Cuxart et al. (2014).

Results show that the SB features depend on the different large-scale wind, which affect the location, timing and evolution of the convergence zone. The wind divergence during the mature phase of the SB (Figure 1) and the associated turbulent kinetic energy (TKE, a proxy for convective updrafts, Figure 2) show overall consistency between the CERRA and Meso-NH outputs at 5 km resolution, with small differences in their location attributable to the smoother representation of the terrain in CERRA. The Probability Density Function (PDF) of the divergence field is similar for CERRA and Meso-NH and skewed towards negative values for both. The vertical structure for winds and TKE is relatively similar (Figure 2), although the the location and magnitude of the TKE maximum present differences. This is due to differences in orography and model parameterizations, resulting in TKE maximums for the Meso-NH model at 5 km (1.5 m2/s2) lower than for CERRA (2.5 m2/s2). Higher resolution Meso-NH domains accurately reproduce these higher values.

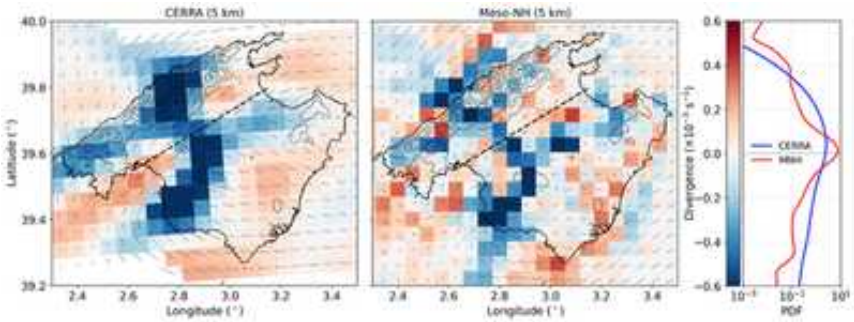


Figure 1. 10m wind vectors and divergence for CERRA (left) and the Meso-NH model (right), with the corresponding PDF for 12 July 22 at 15 UTC.

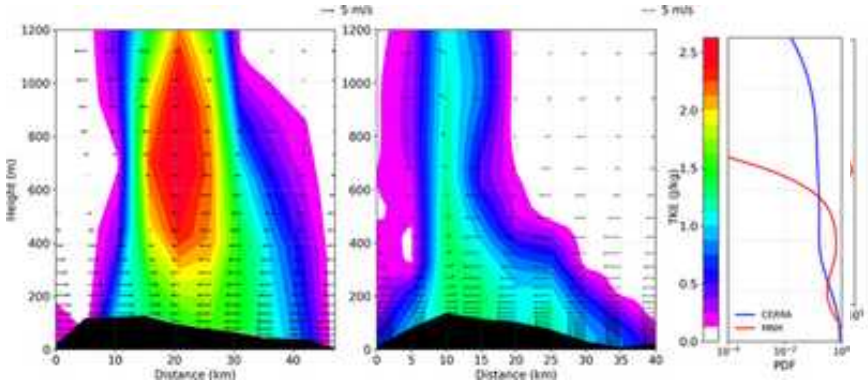


Figure 2. Vertical cross-section (dashed line in Figure 1) and PDF for TKE and wind vectors in CERRA (left) and Meso-NH (right) for 12 July 22 at 15 UTC.

The SB event selection for the CERRA fields is based on Grau et al. (2021) and adapted for the Alcúdia basin from Serra et al. (2026).The sequential filters to select SB events for the Palma and Alcúdia have been: (1) wind direction at 12 or 15 UTC from the sea, (2) wind direction at 03 and 21 UTC not from the sea, (3) LST-SST higher than 5 °C at 12 UTC, (4) LST-T850 higher than 12 °C at 12 UTC and (5) wind speed variation higher than 2 m/s for 12-06 or 15-09 UTC.

RESULTS

Compared to the station-based study by Grau et al. (2021) for 2009-2023, detection based on CERRA (1985-2024 but also explored for 2009-2023 for consistency) identifies consistent seasonal trends yet systematically lower SB frequencies (Figure 3). In the reference month of July, the station-based approach recorded SB frequencies of ~51% in Palma and ~34% in Alcúdia, whereas the CERRA-based method detected ~42% and ~32%, respectively. Simultaneous SB occurrence is also lower using the CERRA-based method (~16% vs. ~21%). While both methods converge under stable summer conditions, they tend to diverge during cooler, transitional months.

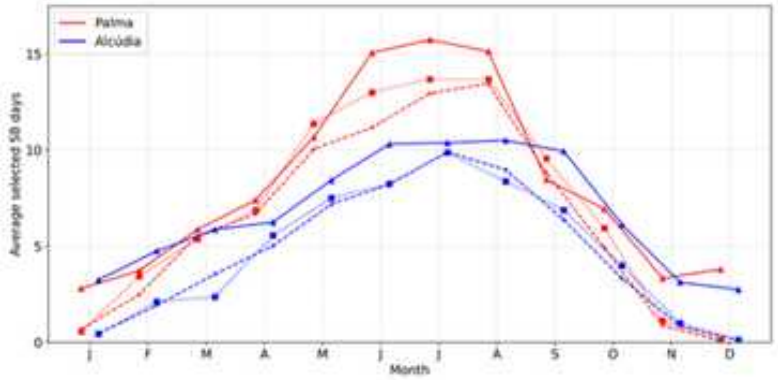


Figure 3: Comparison of average SB events in Palma and Alcúdia between CERRA (1985-2024, dashed; 2009-2024, dotted) and the extended Grau et al. (2021) method (2009-2024, solid).

The average divergence at low levels and TKE at high levels averaged over all years for the month of July (Figure 4) show a general correspondence between convergence and high TKE in the centre of the island, yet no strong TKE signal appears at the northwestern convergence hotspot.

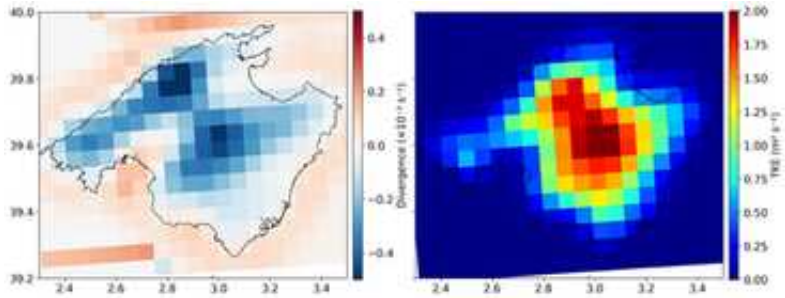


Figure 4: Mean 10m wind divergence (left) and 850hPa turbulent kinetic energy (right) for concurrent selected SB in both basins (1985-2024, 15 UTC in July) for CERRA data.

DISCUSSION Y CONCLUSIONS

When validated against a high-resolution Meso-NH run, CERRA accurately identifies the main features of the convergence area due to the SB generated at the coast. The 40-year analysis effectively characterises the timing and location of both the convergence zone and associated updrafts. While two distinct convergence centres emerge, only one correlates with high TKE. This distinction allows for the differentiation of orography-driven convergence from SB-derived signals. Consequently, our results demonstrate that combining these two variables is essential for the long-term identification of SB events, further validating the selection process. No significant long-term trend in the occurrence of the phenomenon was observed over the study period.

Differences in the physical parameterizations and data assimilation schemes of HARMONIEALADIN and the MesoNH model coupled with SURFEX may affect the representation of SB dynamics. In CERRA, TKE is treated as a diagnostic variable, whereas MesoNH provides a more dynamically consistent prognostic formulation. The smoothing of orography in CERRA reduces basin isolation from largescale flows, potentially inhibiting SB formation.

The selection process may cause the exclusion of real SBs events. A slope wind misrepresentation can affect the timing of the SB and interfere with filters such as (1) and (5): weaker nocturnal downslope flows can shift the SB onset earlier, while wind speed biases due to upslope winds may cause valid events to be filtered out. These issues have been reported in previous work (Serra et al., 2026).

CERRA spatial and temporal resolution is sufficient to capture the key mesoscale features of the SB circulation over complex terrain, something that was not feasible with previous reanalyses such as UERRA (11 km, 6 h) or ERA5 (30 km, 1 h), whose coarser grids could not resolve the island's basin scale structure.

ACKNOWLEDGMENTS

This work is part of the research projects PID2021-124006OB-I00 and PID-2024-159841OA-I00 funded by MCIN/AEI/10.13039/501100011033 and by the European Regional Development Fund (ERDF A way of making Europe).

REFERENCES

Cuxart, J., Jiménez, M. A., Telišman Prtenjak, M., & Grisogono, B. (2014). Study of a Sea-Breeze Case through Momentum, Temperature, and Turbulence Budgets. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, *53*(11), 2589–2609. https://doi.org/10.1175/JAMC-D-14-0007.1

Grau, A., Jiménez, M. A., & Cuxart, J. (2021). Statistical characterization of the sea-breeze physical mechanisms through in-situ and satellite observations. *International Journal of Climatology*, *41*(1), 17–30. https://doi.org/10.1002/joc.6606

Lac, C., Chaboureau, J.-P., Masson, V., Pinty, J.-P., Tulet, P., Escobar, J. … (19) (2018). Overview of the Meso-NH model version 5.4 and its applications. *Geoscientific Model Development*, *11*(5), 1929–1969. https://doi.org/10.5194/gmd-11-1929-2018

Serra, A., Jiménez, M. A., & Maimó-Far, A. (2026). Characteristics of sea breeze in a complex terrain island seen by CERRA. *Atmospheric Research*, *329*, 108451. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2025.108451

MONITORIZACIÓN DE LA NUBOSIDAD CON DATOS SENTINEL-2 Y TÉCNICAS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Juan Carlos GONZÁLEZ[1], Jose Julio RODRIGO[2],
Igor VÁZQUEZ[3], Airam AMADOR[4], Daniel ACOSTA[5]

[1]Geógrafo - analista de datos Cartográfica de Canarias, S.A.
[2]Responsable del Departamento de Ingeniería, Cartográfica de Canarias, S.A.
[3]Analista de datos ambientales Cartográfica de Canarias, S.A.
[4]Geógrafo - analista de datos Cartográfica de Canarias, S.A.
[5]Especialista en Inteligencia Artificial Cartográfica de Canarias, S.A.

jcgonzalez@grafcan.com, jrodrigo@grafcan.com, ivazrod@grafcan.com,
aamagon@grafcan.com, dacoher@grafcan.com

RESUMEN

Esta investigación monitoriza la cobertura nubosa en Canarias transformando máscaras binarias tradicionales en una variable climática continua mediante Inteligencia Artificial y datos Sentinel-2 (2016-2024). Se desarrolla el algoritmo CloudsHR, que emplea Deep Learning para una segmentación en tres clases (suelo, nube ligera y densa), integrando redes neuronales convolucionales y corrección atmosférica para generar un índice de nubosidad normalizado.

Los resultados demuestran que este sistema supera las limitaciones de la umbralización clásica, permitiendo identificar patrones climáticos locales vinculados a la compleja orografía insular a través de series temporales y agregados estadísticos mensuales, estacionales y anuales.

En conclusión, el método CloudsHR se posiciona como una aproximación operativa viable para la vigilancia climática. Su integración en el Portal de Cambio Climático (https://cambioclimatico.sitcan.es/indicadores/nubosidad) de la Consejería de Transición Ecológica y Energía proporciona una herramienta clave para la planificación territorial y la toma de decisiones, facilitando la transición del dato satelital a una gobernanza ambiental basada en la evidencia científica.
Palabras clave Sentinel-2, Inteligencia Artificial, Nubosidad, Cambio Climático, Teledetección.

Palabras clave: Sentinel-2, Inteligencia Artificial, Nubosidad, Cambio Climático, Teledetección.

ABSTRACT

This research monitors cloud cover in the Canary Islands by transforming traditional binary masks into a continuous climate variable using Artificial Intelligence and Sentinel-2 data (2016–2024). The CloudsHR algorithm is developed, employing Deep Learning for three-class segmentation (ground, light cloud, and dense cloud) and integrating convolutional neural networks with atmospheric correction to generate a normalized cloudiness index.

The results demonstrate that this system overcomes the limitations of classic thresholding, identifying local climate patterns linked to the complex island orography through time series and monthly and annual statistical aggregates. In conclusion, the CloudsHR method positions itself as a viable operational approach for climate monitoring. Its integration into the Climate Change Portal (https://cambioclimatico.sitcan.es/indicadores/nubosidad) of the Ministry of Ecological Transition and Energy provides a key tool for regional planning and decision-making, facilitating the transition from satellite data to environmental governance based on scientific evidence.

Key words: Sentinel-2, Artificial Intelligence, Cloud cover, Climate Change, Remote Sensing.

INTRODUCCIÓN

La nubosidad es un componente crítico del sistema climático global y un regulador fundamental de los balances de radiación y recursos hídricos a escala regional. En el archipiélago canario, su dinámica está intrínsecamente relacionada con la latitud subtropical, la influencia semipermanente del anticiclón de las Azores, el flujo constante de los vientos alisios y la presencia de una corriente oceánica fría. Estos factores configuran una marcada estratificación atmosférica caracterizada por una inversión térmica noratlántica, situada habitualmente entre los 800 y 1.500 metros de altitud (Dorta Antequera, 1996). Esta inversión actúa como un límite físico superior que confina la humedad y propicia el desarrollo del característico "mar de nubes" estival en las vertientes de barlovento (Marzol Jaén, 2002). Esta cubierta de estratocúmulos no solo amortigua la insolación, sino que sostiene ecosistemas de alta vulnerabilidad, como la laurisilva, mediante el aporte hídrico de la precipitación horizontal (Fernández-Palacios et al., 2011).

Dada la compleja orografía insular, factores ambientales como la nubosidad presentan una variabilidad espacial extrema a escalas inferiores a los 2 km, resultando especialmente difíciles de modelar mediante interpolación estadística convencional basada en estaciones terrestres (Houze, 2012; Wilson & Silander, 2014).

Por ello, la teledetección espacial se ha consolidado como una herramienta insustituible para el análisis de la dinámica de nubes a alta resolución (Wilson & Jetz, 2016). Históricamente, esta monitorización ha dependido de sensores de alta resolución temporal pero baja resolución espacial, como AVHRR o MODIS (Platnick et al., 2003). Sin embargo, la llegada de la constelación Sentinel-2 de la Agencia Espacial Europea (ESA), con su sensor multiespectral (MSI) y una resolución de hasta 10 metros, ha iniciado una nueva era en la observación del territorio.

A pesar de su potencial, la detección precisa de nubes en Sentinel-2 sigue siendo un desafío técnico abierto. Los procesadores oficiales y los algoritmos estándar más extendidos, como Sen2Cor (que genera la capa de clasificación de escenarios o SCL), Fmask 4.0 (Qiu et al., 2019) o el método multitemporal MAJA (Hagolle et al., 2017), se basan predominantemente en técnicas de umbralización física y análisis de bandas espectrales específicas (como las bandas de absorción de vapor de agua en 1.37 µm). Aunque estos métodos son eficientes a escala continental, presentan severas limitaciones operativas: tienden a generar falsos positivos sobre superficies antrópicas de alta reflectancia (invernaderos, zonas urbanas densas) o sustratos geológicos claros (arenas costeras), al tiempo que subestiman la nubosidad subpíxel, las nubes bajas de poco espesor óptico confinadas en los valles o los cirros fragmentados (Baetens et al., 2019).

Para superar la rigidez intrínseca a la umbralización clásica, la comunidad científica se ha volcado en la aplicación de técnicas de Inteligencia Artificial (IA) y aprendizaje profundo (Deep Learning). Las Redes Neuronales Convolucionales (CNN), mediante arquitecturas de segmentación semántica como U-Net o DeepLabv3, han demostrado una capacidad sobresaliente para asimilar no solo la firma espectral píxel a píxel, sino el contexto espacial y los patrones de textura (Domnich et al., 2021; Jeppesen et al., 2019). El entrenamiento de estos modelos de aprendizaje profundo permite categorizar la nubosidad en imágenes satelitales con una precisión superior, evaluada habitualmente mediante métricas robustas de segmentación semántica como el Intersection over Union (IoU) y la puntuación F1 o Dice Coefficient (López-Puigdollers et al., 2021; Buttar & Sachan, 2022; Li et al., 2023). No obstante, la mayoría de estos desarrollos se limitan a ofrecer máscaras binarias (presencia/ausencia de nube) destinadas exclusivamente al descarte técnico de píxeles ruidosos para generar mosaicos libres de nubes, desaprovechando el valor de la transición espectral de la nube como variable climática continua.

Por otro lado, la explotación de series temporales satelitales cortas para la detección de tendencias exige un rigor matemático estricto. La aplicación de pruebas no paramétricas como el test de Mann-Kendall puede verse severamente sesgada si no se modela la autocorrelación serial inherente a los datos de observación de la Tierra,

lo que obliga a aplicar procesos de pre-blanqueo (pre-whitening) para evitar la inflación de la significancia estadística en las tendencias (Yue et al., 2002; Hamed, 2008). En este contexto, esta investigación propone el desarrollo del algoritmo CloudsHR para transformar una clasificación cualitativa tri-clase obtenida mediante Deep Learning en un índice de nubosidad cuantitativo y continuo espacialmente explícito, adaptado a la casuística microclimática de Canarias. Este desarrollo se integra en el Portal de Cambio Climático de la Consejería de Transición Ecológica y Energía del Gobierno de Canarias, facilitando la transferencia directa entre la vanguardia en teledetección y la gobernanza ambiental basada en la evidencia.

METODOLOGÍA

La metodología se basa en el procesamiento de imágenes multiespectrales de la misión Sentinel-2 correspondientes al periodo 2016-2024. El núcleo del trabajo consiste en la transición de máscaras de nubes binarias hacia un índice cuantitativo continuo mediante el algoritmo CloudsHR.

2.1. Clasificación mediante Deep Learning

Debido a la ineficacia de los algoritmos de umbralización (thresholding) clásicos para detectar nubosidad dispersa en el relieve canario, se emplea un modelo de Deep Learning específicamente entrenado para el archipiélago. Se ha definido una arquitectura de red neuronal convolucional, diseñada para procesar imágenes de dimensiones variables. El modelo ingiere como entrada las imágenes en color verdadero (producto TCI de Sentinel-2, correspondiente a las bandas nativas RGB de 10 metros de resolución espacial). Cada tipo de nube presenta propiedades y características distintas: las nubes bajas y medias son ópticamente densas y ocultan los rasgos de la superficie terrestre, mientras que las nubes altas suelen ser poco densas y hacen que la superficie terrestre parezca brumosa (Le Hégarat-Mascle & André, 2009).

El proceso de segmentación genera máscaras de tres clases diferenciadas (producto Clouds):

- Suelo: Ausencia de nubosidad.
- Nube Ligera: Su brillo es bajo, dejan pasar gran parte de la radiación y se intuye el suelo que está debajo.
- Nube Densa: Reflejan mucha luz y se ven muy blancas y brillantes.

A pesar de la robustez del modelo de aprendizaje profundo, la segmentación puede presentar pequeños errores de clasificación aislados o en los bordes. Para ejercer un control estricto de estos falsos positivos y asegurar la homogeneidad espacial, aplicamos un post-procesamiento morfológico a la salida bruta de la red neuronal.

2.2. Algoritmo de Alta Resolución (CloudsHR)

Para superar la naturaleza discreta de la clasificación IA y obtener un producto de mayor valor climático, se desarrolló el algoritmo CloudsHR. Este procedimiento fusiona la robustez de la IA con la sensibilidad de las bandas espectrales nativas siguiendo estos pasos:

- Ponderación de la Máscara IA: Se asignan factores de peso (0.5 para nubes ligeras y 1.0 para densas) y se aplica un suavizado gaussiano para eliminar efectos de borde y normalizar la capa en el intervalo [0, 1].
- Procesamiento Espectral: Se seleccionan las bandas B2 (Azul) y B9 (Vapor de agua). Se aplica una corrección atmosférica tipo DOS (Dark Object Subtraction) utilizando el percentil 0.5 como valor de referencia.
- Fusión y Normalización: Se multiplican y normalizan las bandas corregidas, aplicando posteriormente la máscara IA suavizada como factor de control para eliminar falsos positivos. El resultado final se escala a un Índice de Nubosidad (0-100).

2.3. Generación de Agregados y Análisis Estadístico

El flujo de trabajo se ha automatizado para procesar cada escena del repositorio histórico, generando productos derivados para tres ámbitos espaciales (Tile S2, territorio insular y vertientes):

- Agregados Temporales: Se calculan medias mensuales, estacionales y anuales, previamente se han descartado las escenas de órbitas parciales.
- Análisis de Tendencias: Para evaluar la significancia de los cambios en la serie 2016-2024, se aplica de manera preliminar la prueba no paramétrica de Mann-Kendall. A efectos exploratorios y sin pretensión de exhaustividad, en el presente trabajo se ha aplicado el test de Mann-Kendall sobre las medias anuales de la serie. Esta agregación temporal atenúa la autocorrelación serial de corto alcance y reduce, aunque no elimina necesariamente, la necesidad de un pre-blanqueo formal.

Este flujo permite transformar el dato satelital bruto en indicadores interoperables listos para su explotación en el Portal de Cambio Climático.

2.4. Evaluación del algoritmo

El rendimiento del modelo base de detección de nubes se evaluó mediante una matriz de confusión sobre un conjunto de muestras aleatorias de las casuísticas típicas del archipiélago canario. La distinción entre las dos categorías de nubosidad responde a la necesidad de capturar tanto la cobertura nubosa opaca, que impide completamente la observación de la superficie, como la nubosidad semitransparente, frecuente en el contexto climático canario y de especial relevancia para el análisis de horas de sol.

Las métricas obtenidas (Figura 1) muestran una exactitud global (Overall Accuracy) del 93,3%. A nivel de clase, la categoría tierra alcanza un acierto del 99,5%, mientras que nube densa y nube ligera obtienen valores de 92,1% y 88,4% respectivamente. La principal fuente de confusión se localiza entre ambas clases de nube, con un 7,6% de muestras de nube densa clasificadas como nube ligera y un 6,6% en sentido inverso, lo cual es esperable dada la continuidad física entre ambas categorías.

Cabe señalar que esta evaluación corresponde al modelo original, previo a los procesos de refinamiento específicos que dieron lugar al producto final CloudsHR. La validación cuantitativa del producto refinado en el contexto climático constituye una línea prioritaria de trabajo futuro (véase sección Discusión).

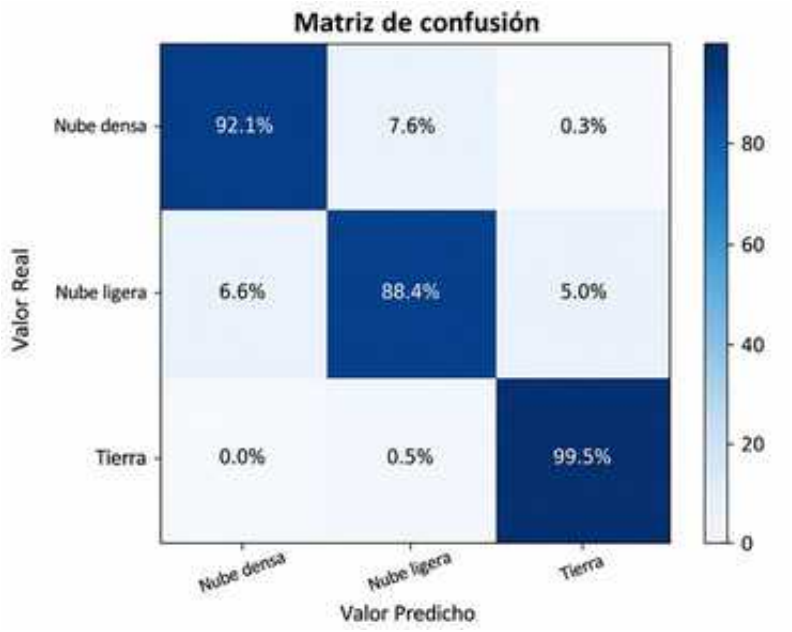


Figura 1. Matriz de confusión del proceso original de detección de nubes. Elaboración propia

RESULTADOS

Los resultados de esta investigación dan lugar a un sistema de monitorización continua de la nubosidad, cuyos productos han sido integrados en el Portal de Cambio Climático de Canarias bajo un cuadro de mando específico para la variable de nubosidad: https://cambioclimatico.sitcan.es/indicadores/nubosidad

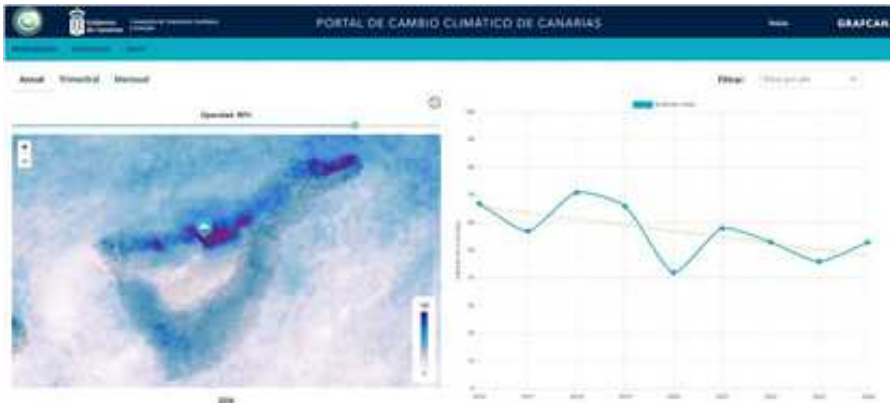


Figura 2. Visor de resultados. Media anual año 2019 y gráfico de evolución 2016-2024. Fuente: Portal de Cambio Climático de Canarias

3.1. Publicación de Agregados Temporales

A partir del procesamiento masivo de la serie histórica Sentinel-2 (2016-2024), se han generado y publicado mapas de síntesis que permiten evaluar la dinámica de la nubosidad en diferentes escalas temporales. El portal ofrece:

- Medias Mensuales y Estacionales: Útiles para identificar la variabilidad estacional y el comportamiento espacial de la nubosidad en periodos críticos para el ciclo hidrológico y la agricultura.
- Medias Anuales: Permiten una visión general de la distribución espacial de la nubosidad, facilitando la identificación de zonas de máxima y mínima persistencia a nivel de archipiélago.

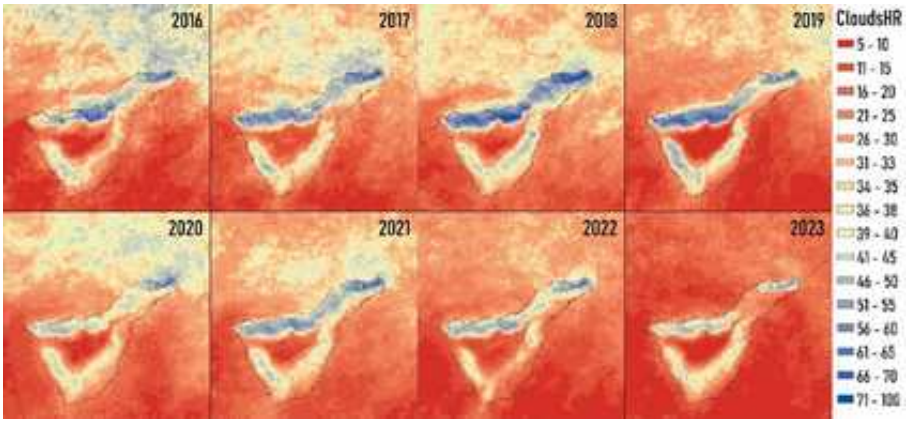


Figura 3. CloudsHR medio anual Tenerife (2016-2023). Elaboración propia

3.2. Visor Interactivo y Consulta a Nivel de Píxel

Uno de los resultados más innovadores es la capacidad de consulta a nivel de píxel para todos los tiles Sentinel-2 que cubren el territorio canario. El sistema permite una interacción dinámica mediante la cual, al realizar un clic sobre cualquier punto del territorio, se genera de forma automática un gráfico de valores CloudsHR, donde se muestran los datos de la serie temporal del índice de nubosidad (0-100) en ese punto específico a lo largo de los años procesados.

3.3. Análisis estadísticos y tendencias

Los resultados preliminares de CloudsHR respaldan el potencial operativo del método para captar variaciones espaciales heterogéneas a escala de local. El análisis exploratorio muestra una menor presencia de nubosidad al contrastar los periodos 2016-2020 y 2021-2024, especialmente visible en las vertientes expuestas al alisio de La Gomera (28RBS), Tenerife (28RCS) y Gran Canaria Norte (28RDS). Los indicios de significancia obtenidos localmente mediante el test de Mann-Kendall se consideran estrictamente preliminares y no justifican afirmaciones sobre tendencias climáticas a largo plazo. Dado que el objetivo de este trabajo se centra en la consistencia del método CloudsHR y no en la atribución climática, un análisis de tendencias concluyente queda pospuesto para fases posteriores, donde se integrará una serie temporal más extensa, la estimación de la pendiente de Sen con sus intervalos de confianza, el control de la autocorrelación espacial y temporal, y procesos de validación cruzada independiente.

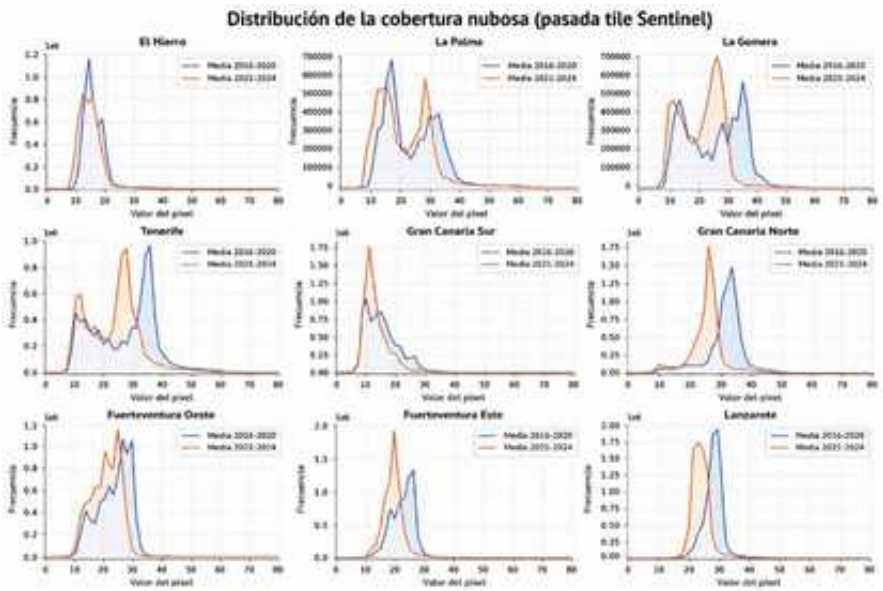


Figura 4. Distribución de los datos de nubosidad en dos periodos 2016-2020 y 2021-2024. Elaboración propia

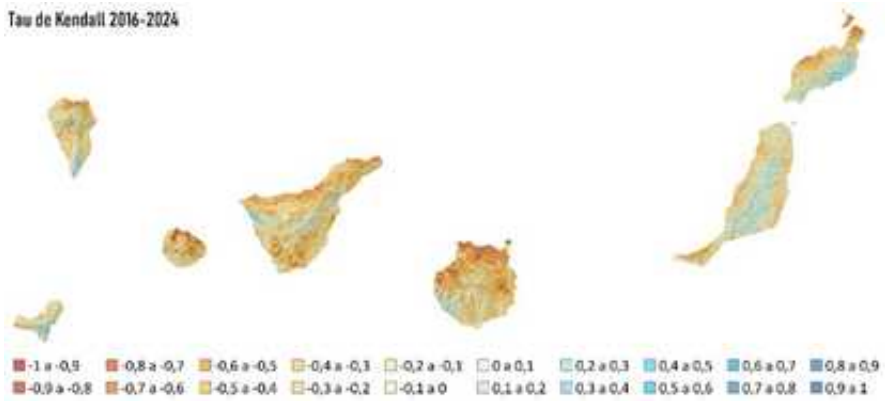


Figura 5. Tau de Kendall CloudsHR 2016-2024. Elaboración propia

DISCUSIÓN

La implementación del algoritmo CloudsHR representa un avance significativo en la monitorización climática de regiones con orografía compleja como Canarias. A diferencia de los métodos de umbralización tradicionales (thresholding), que presentan dificultades para discriminar nubosidad dispersa o cirros sobre superficies antrópicas de alta reflectancia, la integración de Deep Learning permite discriminar eficazmente los elementos antrópicos. La fusión de la máscara de IA con las bandas espectrales B2 y B9 de Sentinel-2 logra transformar un descarte técnico (máscara de nubes) en una variable climática continua de alta resolución espacial (40 m de resolución espacial de salida).

4.1. Resolución espacial vs. temporal

Un aspecto discutido en el planteamiento de este trabajo es el compromiso entre resolución espacial y temporal. Mientras que los satélites meteorológicos (como Meteosat) ofrecen una altísima frecuencia temporal para el seguimiento de la dinámica atmosférica en tiempo real, su resolución espacial es insuficiente para caracterizar la variabilidad microclimática impuesta por el relieve insular. El uso de la constelación Sentinel-2 permite capturar con precisión métrica la distribución de la nubosidad en vertientes y cuencas específicas, lo cual es fundamental para estudios de detalle en agricultura y gestión forestal. No obstante, la revisita de 5 días y la hora fija de paso limitan la observación de la evolución diurna de la nubosidad, una restricción que debe ser considerada al interpretar los promedios mensuales, estacionales y anuales. Hay que tener en cuenta que Sentinel-2 opera con satélites en una órbita heliosíncrona por lo que todas las escenas analizadas son capturadas entre las 11 y las 12 (hora local).

4.2. Validación de los datos

Los resultados de la evaluación base reflejan un comportamiento sólido del modelo de partida, especialmente en la discriminación de superficies terrestres, donde el nivel de acierto es prácticamente perfecto (99,5 %). Este rendimiento es consistente con el historial operativo del algoritmo, previamente validado en aplicaciones de monitorización de cultivos, lo que confirma que CloudsHR no parte de un modelo experimental sino de una tecnología contrastada, adaptada a un nuevo dominio de aplicación. La confusión residual entre nube densa y nube ligera no constituye un fallo del sistema sino una consecuencia inherente a la gradación continua de la cubierta nubosa.

Como línea prioritaria de trabajo futuro, se prevé llevar a cabo una validación de los resultados de CloudsHR mediante su comparación con datos de radiación solar registrados por los piranómetros de la red de estaciones meteorológicas del Gobierno de Canarias. Para ello, se contempla transformar la irradiancia medida en tierra en índice de claridad (Kt), normalizando respecto a la irradiancia extraterrestre, lo que permitirá situar ambas variables en una escala funcionalmente comparable. Por otro lado, se calcularán métricas de error estándar como el RMSE y el MBE, que permitirán cuantificar respectivamente la magnitud de las desviaciones y los sesgos sistemáticos del algoritmo, complementadas con el coeficiente de correlación de Pearson y, dado el carácter no gaussiano de la distribución de la variable, con la correlación de Spearman como alternativa no paramétrica. Asimismo, se elaborarán diagramas de dispersión y bandas de confianza para visualizar el ajuste global. A diferencia de los sensores geoestacionarios de baja resolución espacial, la resolución de 40 metros de CloudsHR reduce considerablemente el desajuste espacial respecto a la medición puntual del piranómetro. La validación contemplará el desajuste temporal derivado de la revisita de Sentinel-2, que con una cadencia de 5 días sobre las Islas Canarias limita la comparación a instantes de paso discretos y no permite una cobertura temporal continua. Por último, se plantea estratificar el análisis por condición de cielo (despejado, parcialmente nublado y cubierto), con el fin de identificar en qué regímenes de nubosidad el algoritmo presenta un comportamiento más o menos robusto.

4.3. Significación de la serie temporal (2016-2024)

Bajo un estricto criterio de prudencia climatológica, los resultados de la prueba de Mann-Kendall se presentan exclusivamente como una aproximación al comportamiento local de la serie actual. Una ventana temporal de 9 años (2016-2024) resulta insuficiente para fundamentar tendencias de cambio climático, dado que los estadísticos pueden verse condicionados por la variabilidad interanual o eventos meteorológicos coyunturales. Por ello, el valor principal de este trabajo es el desarrollo

del método. La consolidación operativa de CloudsHR asegura que, conforme la misión Sentinel-2 acumule más años de registro, la región dispondrá de una base de datos de alta resolución sin precedentes, idónea para albergar en el futuro análisis climatológicos rigurosos a largo plazo.

4.4. Aplicación a la gobernanza climática

La integración de estos indicadores en el portal de Cambio Climático de Canarias supone un salto cualitativo desde la monitorización puramente científica hacia la gobernanza basada en la evidencia. Disponer de mapas de nubosidad y tendencias espaciales permite a los gestores públicos identificar zonas de mayor vulnerabilidad ante cambios en el régimen de vientos o variaciones en la humedad disponible. Esto resulta de especial interés para la protección de ecosistemas asociados a la precipitación horizontal del mar de nubes y para la planificación de recursos hídricos en un contexto de incertidumbre climática.

CONCLUSIONES

La implementación del algoritmo CloudsHR prepara un sistema operativo para la monitorización de la nubosidad en Canarias, superando las limitaciones de las máscaras binarias convencionales gracias a la Inteligencia Artificial. La integración de este índice continuo y sus series temporales (2016-2024) en el Portal de Cambio Climático de Canarias dota a la administración de una herramienta estratégica para la gobernanza ambiental. Este avance permite caracterizar la nubosidad con una precisión espacial que da respuesta a la compleja interacción entre la dinámica atmosférica y la orografía insular.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su más sincero agradecimiento a Gustavo Pestana, jefe de Servicio de Cambio Climático e Información Ambiental de la Consejería de Transición Ecológica y Energía del Gobierno de Canarias, por su visión e impulso institucional en el desarrollo de estas herramientas. Asimismo, se agradece especialmente la dedicación y el apoyo técnico de Javier Luis Ramos y Rocío González, cuya colaboración ha sido fundamental para la exitosa integración y operatividad de los indicadores en el Portal de Cambio Climático.

REFERENCIAS

Baetens, L., Desjardins, C., & Hagolle, O. (2019). Validation of Copernicus Sentinel-2 cloud masks obtained from MAJA, Sen2Cor, and FMask processors using reference cloud masks generated with a supervised active learning procedure. *Remote Sensing, 11*(4), 433. https://doi.org/10.3390/rs11040433

Buttar, N., & Sachan, M. K. (2022). Semantic segmentation of clouds in satellite images based on U-Net++ architecture and attention mechanism. *Expert Systems with Applications*, *210*, 118380. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.118380

Domnich, M., Sünter, I., Trofimov, H., Wold, O., Harun, F., Kostiukhin, A., Järveoja, M., Veske, M., Tamm, T., Voormansik, K., Olesk, A., Boccia, V., Longepe, N., & Cadau, E. G. (2021). *KappaMask: AI-based cloudmask processor for Sentinel-2*. *Remote Sensing, 13*(20), 4100. https://doi.org/10.3390/rs13204100

Dorta Antequera, P. (1996). Las inversiones térmicas en Canarias. Investigaciones Geográficas, (15), 109–124. https://doi.org/10.14198/INGEO1996.15.01

Fernández-Palacios, J. M., de Nascimento, L., Lancaster, D. G., et al. (2011). The laurel forest of Tenerife: What do we know about its history, distribution and ecology? Vieraea, 39, 149-186. https://doi.org/10.1007/s004680050055

Hagolle, G., Huc, M., Villa Pascual, D., & Dedieu, G. (2017). MAJA Cloud Mask and Atmospheric Correction Software. Open Source Geospatial Software.

Hamed, K. H. (2008). Trend detection in hydrologic data: The Mann–Kendall trend test under the scaling hypothesis. *Journal of Hydrology, 349*(3–4), 350–363. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.11.009
Houze, R. A. (2012). Orographic effects on precipitating clouds. Reviews of Geophysics, 50(1). https://doi.org/10.1029/2011RG000365

Jeppesen, J. H., Jacobsen, R. H., Ingholt, F., & Toftegaard, T. S. (2019). Cloud detection in Satellite Imagery using Deep Learning. Remote Sensing of Environment, 233, 111354. https://doi.org/10.1109/SEB4SDG60871.2024.10629738

Le Hégarat-Mascle, S., & André, C. (2009). Use of Markov random fields for automatic cloud/shadow detection on high resolution optical images. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 64(4), 351–366. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2008.12.007

Li, X., Chen, S., Wu, J., Li, J., Wang, T., Tang, J., Hu, T., & Wu, W. (2023). Satellite cloud image segmentation based on lightweight convolutional neural network. *PLOS ONE*, *18*(2), e0280408. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0280408

López-Puigdollers, D., Mateo-García, G., & Gómez-Chova, L. (2021). Benchmarking deep learning models for cloud detection in Landsat-8 and Sentinel-2 images. *Remote Sensing*, *13*(5), 992. https://doi.org/10.3390/rs13050992

Marzol Jaén, M. V. (2002). El clima de Canarias. En Geografía de Canarias (Vol. 1, pp. 163-210). Editorial Interinsular Canaria.

Platnick, S., King, M. D., Ackerman, S. A., et al. (2003). The MODIS cloud products: Algorithms and examples from Terra. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 41(2), 459-473. http://doi.org/10.1109/TGRS.2002.808301

Qiu, S., Zhu, Z., & He, B. (2019). Fmask 4.0: Improved cloud and cloud shadow detection in Landsat 4–8 and Sentinel-2 imagery. Remote Sensing of Environment, 231, 111205. https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.05.024

Wilson, A. M., & Silander, J. A. (2014). Estimating uncertainty in daily weather interpolations: A Bayesian framework for developing climate surfaces. International Journal of Climatology, 34(8), 2573–2584. https://doi.org/10.1002/joc.3859

Wilson, A. M., & Jetz, W. (2016). Remotely sensed high-resolution global cloud dynamics for predicting ecosystem and biodiversity distributions. PLOS Biology, 14(3), e1002415. https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1002415

Yue, S., Pilon, P., Phinney, B., & Cavadias, G. (2002). The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series. Hydrological Processes, 16(9), 1807-1829. https://doi.org/10.1002/hyp.1095

ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL DE LA PRECIPITACIÓN EN EL NORESTE ARGENTINO A PARTIR DE REDES DE MEDICIÓN CONVENCIONALES Y NO CONVENCIONALES

Raúl ANDRÉS DURÁN [1] , Federico A. ROBLEDO [2,3,4], Leandro B. DÍAZ2,[3,4]

[1] *Servicio Meteorológico Nacional (SMN)*
[2] *Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos (DCAO). Buenos Aires, Argentina.*
[3] *CONICET – Universidad de Buenos Aires. Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA). Buenos Aires, Argentina.*
[4] *Instituto Franco-Argentino de Estudios sobre el Clima y sus Impactos (IFAECI) – IRL 3351 – CNRS-CONICET-IRD-UBA. Buenos Aires, Argentina.*

rduran@smn.gob.ar, federicocharlier@gmail.com, ldiaz@cima.fcen.uba.ar

RESUMEN

La precipitación es una variable esencial del sistema climático y, al mismo tiempo, una de las más difíciles de medir y representar espacialmente con precisión, especialmente en regiones con escasa cobertura de redes oficiales. Esta investigación analiza la variabilidad espacio-temporal de la precipitación en el noreste de Argentina, con foco en el Departamento Bermejo (Chaco), mediante la integración de observaciones instrumentales y satelitales.

Se utilizaron tres fuentes de información complementarias: estaciones convencionales (EC) del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), estaciones no convencionales (ENC) pertenecientes a una red comunitaria coproducida en el marco del proyecto internacional CLIMAX, y estimaciones satelitales ajustadas con observaciones en superficie mediante el producto SQPE-OBS del SMN. Se evaluó la coherencia entre fuentes a escala estacional utilizando métricas de desempeño (Bias, RMSE y correlación de Pearson) y comparaciones de promedios regionales, para el período 2018–2023.

Los resultados revelan una marcada heterogeneidad espacial y temporal de la precipitación, con diferencias significativas entre estaciones próximas, especialmente en eventos convectivos intensos. Se destaca que las ENC logran capturar esta variabilidad local con una fiabilidad comparable a las series de referencia oficiales. Por su parte, el SQPE-OBS mostró una alta consistencia con los promedios regionales, aunque persiste la subestimación en eventos extremos.

Este estudio destaca la importancia de combinar observaciones convencionales, comunitarias y satelitales para mejorar el monitoreo hidrometeorológico en regiones con baja densidad de observación. Asimismo, ofrece un marco metodológico replicable para validar y complementar fuentes de información heterogéneas, fortaleciendo la capacidad de análisis climático a escala regional.

Palabras clave: precipitación estacional, variabilidad climática, observaciones instrumentales, redes comunitarias, SQPE-OBS, noreste argentino.

ABSTRACT

Precipitation is an essential variable of the climate system and, simultaneously, one of the most challenging to measure and represent spatially with precision, particularly in regions with sparse official network coverage. This research analyzes the spatiotemporal variability of precipitation in Northeast Argentina, focusing on the Bermejo Department (Chaco), through the integration of instrumental and satellite observations.

Three complementary information sources were used: conventional stations (EC) from the National Meteorological Service (SMN), unconventional stations (ENC) belonging to a community network co-produced within the framework of the international CLIMAX project, and satellite estimates adjusted with surface observations via the SMN's SQPE-OBS product. The consistency between sources was evaluated at a seasonal scale for the 2018–2023 period, utilizing performance metrics (Bias, RMSE, and Pearson correlation) and regional average comparisons.

The results reveal marked spatial and temporal heterogeneity of precipitation, with significant differences between nearby stations, especially during intense convective events. Notably, the ENCs successfully capture this local variability with a reliability comparable to official reference series. For its part, SQPE-OBS showed high consistency with regional averages, although underestimation persists in extreme events.
This study highlights the importance of combining conventional, community, and satellite observations to improve hydrometeorological monitoring in regions with low observation density. Furthermore, it offers a replicable methodological framework to validate and complement heterogeneous information sources, strengthening regional climate analysis capabilities.

Key words: seasonal precipitation, climate variability, instrumental observations, community networks, SQPE-OBS, Northeast Argentina.

INTRODUCCIÓN

La precipitación constituye una de las variables climáticas más relevantes y, al mismo tiempo, más complejas de caracterizar debido a su alta variabilidad espacial y temporal, especialmente en regiones dominadas por procesos convectivos. El noreste argentino (NEA) presenta un régimen pluviométrico con una marcada estacionalidad (Cravero et al., 2017), donde esta variabilidad se ve acentuada por la baja densidad de estaciones meteorológicas convencionales (EC), lo que limita la representación adecuada de los patrones espaciales de lluvia y dificulta el monitoreo climático a escala locales (Flores et al., 2024).

En este contexto, la incorporación de fuentes alternativas de información, como redes de observación no convencionales (ENC) y productos derivados de teledetección, ha cobrado creciente relevancia. En el área de estudio, desde noviembre de 2017 se codiseñó una Red Comunitaria Local de monitoreo de precipitaciones en el departamento Bermejo (RCB), al este de la provincia del Chaco (Robledo et al., 2018), la cual permite incrementar significativamente la densidad espacial de observaciones. Por su parte, las estimaciones satelitales ofrecen cobertura espacial continua y alta resolución temporal, aunque presentan limitaciones inherentes a los algoritmos de estimación, en la detección de eventos convectivos intensos (Hong et al., 2006). Con el objetivo de reducir estas incertidumbres, el SMN ha desarrollado el producto SQPE-OBS, que integra información satelital con datos de estaciones meteorológicas (Hobouchian et al., 2021).

Si bien diversos estudios han abordado la validación de productos satelitales y la comparación entre distintas fuentes de datos, persiste la necesidad de enfoques integrados que consideren simultáneamente observaciones convencionales, comunitarias y remotas bajo un marco metodológico común y en escalas temporales relevantes para la climatología. En este sentido, la escala trimestral permite atenuar la variabilidad de alta frecuencia y analizar el comportamiento de la precipitación en función de los principales regímenes estacionales.

El presente trabajo tiene como objetivo analizar la variabilidad espacial y temporal de la precipitación en el Departamento Bermejo (provincia del Chaco, Argentina), mediante la comparación de tres fuentes de datos: estaciones convencionales, estaciones no convencionales pertenecientes a la RCB y estimaciones satelitales del SQPE-OBS. En particular, se busca evaluar la coherencia entre estas fuentes a escala trimestral, así como identificar sus principales fortalezas y limitaciones en la representación de la precipitación regional.

METODOLOGÍA

El área de estudio corresponde al Departamento Bermejo, ubicado en la provincia del Chaco, en el noreste de Argentina (Figura 1). Se utilizaron datos de precipitación acumulada diaria, registrados a las 12 UTC. Si bien el análisis se realizó en múltiples escalas temporales (diaria, mensual, trimestral y anual), el presente trabajo se enfoca exclusivamente en la escala trimestral, ya que la misma permite una representación más robusta de la variabilidad estacional de la precipitación, reduciendo la influencia de la alta variabilidad (diaria y/o mensual) asociada a los procesos convectivos característicos del noreste argentino. Se consideraron los trimestres climatológicos estándar (DEF, MAM, JJA y SON). El período de estudio se definió en función de la disponibilidad de datos de las ENC, abarcando desde el 1 de septiembre de 2018 hasta el 31 de diciembre de 2023 (período 2018–2023). La limitada extensión temporal de la serie no permite obtener resultados estadísticamente representativos a escala anual.

Se emplearon tres fuentes de información pluviométrica. En primer lugar, se seleccionaron seis de los diecisiete puntos de medición pertenecientes a la RCB (PB4: 26,99°S, 58,87°O; PB5: 27,04°S, 58,68°O; PB11: 26,93°S, 58,66°O; PB12: 26,86°S, 58,80°O; PB24: 26,87°S, 58,58°O; PB26: 26,96°S, 58,58°O) en función de los controles de calidad aplicados a las series (no mostrados). En segundo lugar, se utilizaron cuatro EC seleccionadas por su proximidad espacial a las ENC, incluyendo tres estaciones del SMN (Resistencia Aero: 27.45°S, 59.98°O (Rcia); Corrientes Aero: 27.48°S, 58.83°O (Ctes); Formosa Aero: 25.74°S, 57.64°O (Fsa)) y una perteneciente a la Dirección de Meteorología e Hidrología de Paraguay (Pilar: 26.85°S, 58.31°O) (Figura 1), consideradas como referencia por la calidad de sus registros. Finalmente, se incorporaron estimaciones satelitales de precipitación correspondientes al producto SQPE-OBS (Hobouchian et al., 2021). Para el producto satelital, se trabajó con el promedio regional de los valores estimados en todos los píxeles que abarcan el área mínima que contiene a las seis ENC (PAHE) (Figura 1).

Las ENC corresponden a puntos de medición de precipitación operados por observadores locales previamente capacitados, incluyendo familias rurales, personal docente y estudiantes de Escuelas de la Familia Agrícola (como la EFA N°68 Cancha Larga), quienes realizan las mediciones diarias a las 12 UTC siguiendo normas internacionales y utilizando pluviómetros tipo "B" con vaso medidor de vidrio. Tanto las capacitaciones como los pluviómetros fueron provistos por personal de la Universidad de Buenos Aires (UBA) que ayudó a diseñar la RCB. De esta manera, la inversión realizada por los lugareños para formar parte de la RCB, es nula. En contraste, las EC pertenecen a servicios meteorológicos oficiales y son operadas por personal técnico especializado, estando destinadas a la observación de un mayor número de variables meteorológicas.

Se analizó la marcha de la precipitación acumulada trimestral para cada fuente de datos, así como sus respectivos promedios espaciales, con el objetivo de evaluar la consistencia temporal, la representatividad y las posibles diferencias sistemáticas entre los distintos sistemas de observación. Asimismo, se cuantificó la coherencia entre las distintas fuentes mediante métricas estadísticas ampliamente utilizadas: el sesgo medio (Bias), utilizado para evaluar diferencias sistemáticas entre fuentes, el error cuadrático medio (RMSE), que cuantifica la magnitud de las diferencias observadas, y el coeficiente de correlación de Pearson (r), empleado para analizar la coherencia temporal entre las series (Blanco Pérez et al., 2023). Estas métricas se calcularon para cada combinación posible de estaciones y fuentes de datos.

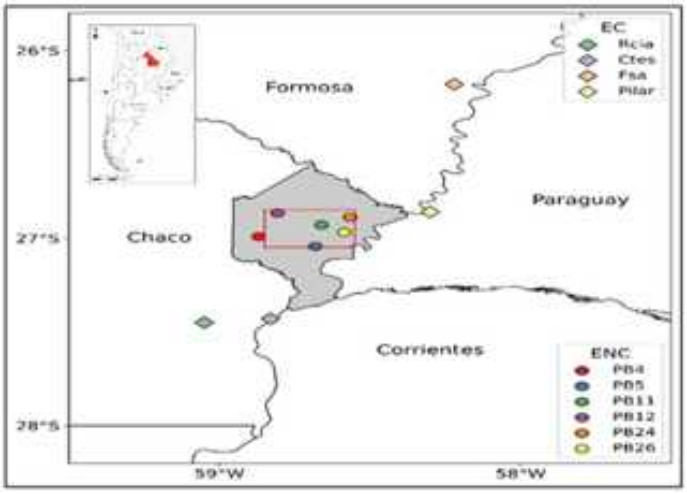


Figura 1. Localización de EC (Rcia: Resistencia Aero, Ctes: Corrientes Aero, Fsa: Formosa Aero, y Pilar) y las ENC (PB4, PB5, PB11, PB12, PB24 y PB26). El recuadro en rojo corresponde al área utilizada para el cálculo del promedio areal del hidroestimador (PAHE).

RESULTADOS

El análisis de las marchas trimestrales (Figura 2) evidencia una dinámica temporal consistente entre las distintas fuentes de datos. Las ENC (Figura 2 derecha) reproducen adecuadamente el ciclo estacional observado en las EC (Figura 2 izquierda), mostrando una evolución similar tanto en la ocurrencia de máximos como de períodos secos. Los promedios espaciales, PEC y P-ENC, presentan una alta coherencia temporal, lo que refuerza su utilidad como representaciones integradas del régimen pluviométrico. No obstante, se identifican diferencias sistemáticas entre fuentes: las ENC tienden a registrar mayores valores en los máximos trimestrales, evidenciando una mayor capacidad para captar eventos localmente intensos, mientras que las EC presentan una señal más amortiguada, posiblemente asociada a su menor densidad espacial. Asimismo, se observan leves desfasajes en trimestres puntuales

sin alterar el ciclo estacional. En los mínimos, ambas redes muestran buena concordancia, aunque las ENC presentan mayor dispersión entre estaciones, reflejando una mayor sensibilidad a la variabilidad espacial.

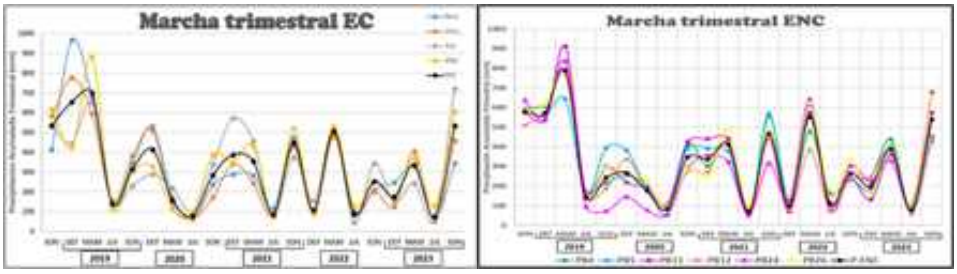


Figura 2. Marcha de precipitación acumulada trimestral (mm): izquierda, las cuatro EC junto al P-EC; derecha, las seis ENC junto al P-ENC. En cada grafico las estaciones tienen un color característico.

Con el fin de cuantificar estas diferencias, se calcularon los índices Bias, RMSE y, correlación de Pearson (pearson), para todas las combinaciones posibles de pares de estaciones: entre dos EC, entre dos ENC y entre EC–ENC. En la Tabla 1 se muestran las mejores "(+)" y, peores "(-)" relaciones en cada comparación. Entre las EC, la combinación Rcia–Ctes muestra la mayor concordancia, mientras que Rcia–Fsa presenta menor coherencia, aunque con bajo sesgo. Entre las ENC, PB11–PB26 se destaca por su alto desempeño, superando en general a las EC, mientras que PB5–PB24 presenta resultados más moderados. En las comparaciones mixtas, Pilar–PB5 muestra buena correlación con errores intermedios, mientras que Rcia–PB24 presenta el mayor RMSE y menor coherencia.

		EC-EC		ENC-ENC		EC-ENC	
		Rcia-Ctes (+)	Rcia-Fsa (-)	PB11-PB26 (+)	PB5-PB24 (-)	Pilar-PB5 (+)	Rcia-PB24 (-)
Trimestral	Bias (mm)	13,33	-2,32	-19,51	37,40	-24,92	-2,73
	RMSE (mm)	77,44	179,82	62,09	162,12	142,47	233,62
	Pearson	0,63	0,41	0,97	0,79	0,77	0,53

Tabla 1. Índices estadísticos: Bias (mm), RMSE (mm), correlación de Pearson (Pearson, adimensional) de las mejores "(+)" y, peores "(-)" relaciones de a pares de estaciones entre: dos EC a la izquierda, dos ENC en el centro y, una EC y una ENC, a la derecha.

En términos generales, las ENC evidencian mayores valores de correlación que las EC, lo que indica una mejor representación de la variabilidad temporal, aunque con sesgos más elevados. El RMSE resulta comparable entre redes, lo que sugiere discrepancias en magnitud más que en la dinámica de la precipitación. Estos resultados destacan la complementariedad entre fuentes y el potencial de las ENC para mejorar la representación espacial y temporal.

Para evaluar al producto SQPE-OBS, se realizó la comparación entre el promedio de las EC (PEC), el promedio de las ENC (PENC) y, el promedio areal del hidroestimador (PAHE). Las marchas temporales (Figura 3) muestran una evolución similar entre las tres fuentes, en línea con los resultados anteriores. En general, el PAHE y el P-ENC presentan mayor coherencia entre sí, mientras que el PEC muestra mayor variabilidad relativa. Asimismo, se observa un comportamiento diferencial del producto satelital a lo largo del período analizado: entre 2019 y 2021 tiende a subestimar la precipitación respecto a las otras fuentes, mientras que en 2022 y 2023 presenta valores relativamente superiores.

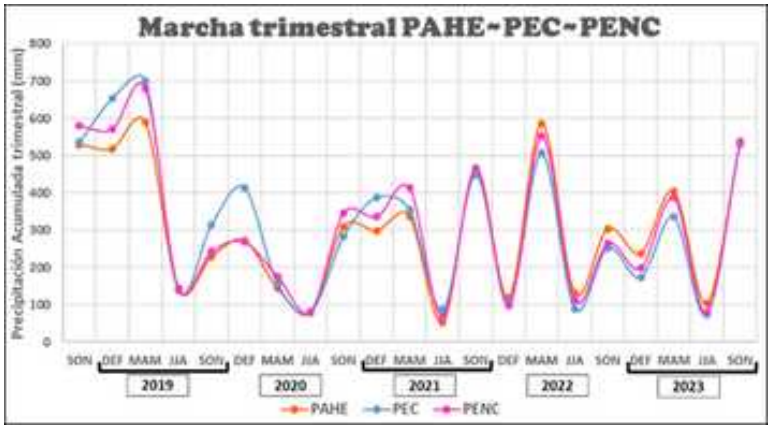


Figura 3. Marcha de promedio de precipitación acumulada trimestral de las tres bases de datos. PAHE en color naranja, PEC en color celeste, y PENC en color rosa.

Por último, se muestra el análisis de los índices estadísticos (Tabla 2), los resultados confirman una alta concordancia general, destacándose la mayor coherencia entre el PAHE y el P-ENC, evidenciada en el menor RMSE y la mayor correlación. No obstante, el sesgo indica una tendencia sistemática del producto satelital a subestimar la precipitación en relación con las observaciones en superficie.

		PAHE-PEC	PAHE-PENC	PEC-PENC
Trimestral	Bias (mm)	-11,88	-11,12	0,76
	RMSE (mm)	65,07	37,53	50,09
	Pearson	0,94	0,98	0,97

Tabla 2. Índices estadísticos mensuales y trimestrales para las relaciones entre los diferentes pares entre las tres bases de datos.

En términos generales, las ENC evidencian mayores valores de correlación que las EC, lo que indica una mejor representación de la variabilidad temporal, aunque con sesgos más elevados. El RMSE resulta comparable entre redes, lo que sugiere discrepancias en magnitud más que en la dinámica de la precipitación. Estos resultados destacan la complementariedad entre fuentes y el potencial de las ENC para mejorar la representación espacial y temporal.

Para evaluar al producto SQPE-OBS, se realizó la comparación entre el promedio de las EC (PEC), el promedio de las ENC (PENC) y, el promedio areal del hidroestimador (PAHE). Las marchas temporales (Figura 3) muestran una evolución similar entre las tres fuentes, en línea con los resultados anteriores. En general, el PAHE y el P-ENC presentan mayor coherencia entre sí, mientras que el PEC muestra mayor variabilidad relativa. Asimismo, se observa un comportamiento diferencial del producto satelital a lo largo del período analizado: entre 2019 y 2021 tiende a subestimar la precipitación respecto a las otras fuentes, mientras que en 2022 y 2023 presenta valores relativamente superiores.

DISCUSIÓN

La comparación entre las distintas fuentes de datos evidencia que ninguna herramienta es autosuficiente para el monitoreo de la precipitación en el NEA. La fiabilidad de las ENC, validada mediante el uso de descriptores estadísticos clásicos (como Bias y RMSE), ampliamente utilizados en la literatura, en comparación con las estaciones oficiales más cercanas, posiciona a la ciencia ciudadana como un pilar fundamental. Los resultados, que se alinean con los hallazgos de Muller et al. (2015), demuestran que la integración de la red comunitaria no solo suple una carencia técnica, sino que aporta datos con una precisión comparable a los de las EC, siendo especialmente valiosa en la validación de productos satelitales en zonas rurales.

Respecto a las diferencias observadas entre algunos pares de estaciones, las cuales resultan aparentemente contraintuitivas (como la alta concordancia entre Pilar y PB5, y/o la correlación moderada entre PB5 y PB24, a pesar de su mayor proximidad geográfica), estas no se asocian a cuestiones instrumentales o metodológicas, dado que las ENC utilizan equipamiento homogéneo y protocolos de medición estandarizados, incluyendo horarios y procedimientos de observación equivalentes. En este contexto, las discrepancias encontradas responden fundamentalmente a la elevada variabilidad espacial de la precipitación convectiva característica del noreste argentino, donde los eventos intensos pueden generar diferencias significativas incluso entre sitios relativamente próximos.

Por su parte, la subestimación del producto SQPE-OBS durante eventos intensos sugiere limitaciones en los algoritmos de estimación asociados a la detección de convección profunda y a la rápida evolución temporal de los sistemas convectivos, característicos de la región. Esto coincide con evaluaciones previas de algoritmos de hidroestimación en el sudeste de Sudamérica (Hobouchian et al., 2021). No obstante, su resolución espacial de 4 km y cobertura continua compensan parcialmente la baja densidad de estaciones convencionales, aportando información valiosa para el análisis regional..

Esta sinergia entre datos "desde arriba" (satélite) y "desde el suelo" (red oficial y comunitaria) permite una caracterización del riesgo hídrico mucho más representativa del territorio, reduciendo la incertidumbre asociada a la detección y representación de eventos extremos. Asimismo, el enfoque propuesto para evaluar la coherencia espacial y la sincronía operativa entre tres fuentes hidrometeorológicas de distinta naturaleza constituye un aporte metodológico novedoso, ya que no se registran antecedentes específicos de este tipo de análisis integrado en la literatura disponible.

En este marco, los resultados obtenidos sugieren que la integración futura de observaciones convencionales, comunitarias y satelitales podría contribuir al desarrollo de series de precipitación más robustas y espacialmente representativas para el NEA. En particular, las ENC muestran potencial para complementar las redes oficiales y fortalecer los procesos de validación y ajuste regional de productos satelitales, especialmente en áreas rurales con baja densidad de monitoreo. Bajo esta perspectiva, un esquema integrado de reconstrucción regional podría estructurarse mediante algoritmos de corrección de sesgo —como técnicas de PDF-matching local o interpolaciones geoestadísticas del tipo Kriging con deriva externa—. En este contexto, las EC actuarían como referencia instrumental regional, las ENC aportarían el ajuste fino de la variabilidad convectiva local y el producto satelital proveería una continuidad y cobertura espacial homogénea.

CONCLUSIONES

El análisis integrado de diversas fuentes de medición en el noreste argentino evidencia que la complementariedad entre redes constituye la estrategia más robusta para el monitoreo climático en regiones con baja densidad instrumental.

Las estaciones no convencionales (ENC) demostraron una calidad de datos comparable a las redes oficiales a escala trimestral, con la ventaja de captar la variabilidad espacial y los gradientes asociados a eventos convectivos. Su desempeño refuerza el valor de la coproducción de datos y la ciencia ciudadana como una herramienta técnica fiable para densificar la observación y mejorar la representación local de la precipitación.

Por su parte, el producto satelital SQPE-OBS se presenta como una herramienta eficaz para el monitoreo regional continuo, particularmente en condiciones de baja precipitación. Sin embargo, su tendencia a subestimar eventos intensos pone de manifiesto la necesidad de ajustes locales basados en observaciones en superficie para reducir sesgos en la estimación de extremos.

Finalmente, este marco metodológico de integración de fuentes heterogéneas constituye un avance significativo para el NEA. La combinación del alcance espacial del satélite con la precisión puntual de las redes comunitarias y oficiales permite una mejor comprensión de la variable en contexto, optimizando la capacidad de respuesta ante la variabilidad climática y los eventos extremos en el territorio.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero expresar mi gratitud a mi familia por el acompañamiento y apoyo constante. A la universidad pública argentina, por brindar el espacio de formación y desarrollo académico, y al SMN, por el acceso a datos y por contribuir a mi formación profesional. Asimismo, agradezco a mis amigos y a mis compañeros de trabajo por su apoyo y colaboración cotidiana. De manera especial, a los directores de mi tesis por su dedicación y acompañamiento académico. Finalmente, reconozco y agradezco a la Red Comunitaria de Bermejo (RCB), cuyo compromiso sostenido en la generación de datos hizo posible la construcción de la base observacional que sustenta esta investigación.

REFERENCIAS

Blanco Pérez, M. A., Demaria, E., Cazenave, G., & Zimmermann, E. D. (2023). Validación y corrección de estimaciones de precipitación satelital utilizando observaciones en superficie en la región pampeana argentina. Tecnología y Ciencias del Agua, 14(2), 110–168.

Cravero, S. A. C., Bianchi, C. L., Elena, H. J., & Bianchi, A. R. (2017). Clima de Argentina: Mapas digitales mensuales de precipitación y precipitación menos evapotranspiración potencial. Adenda del Atlas climático digital de la República Argentina. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA).

Flores, K., Skansi, M., Poggi, M., Garay, N., & Veiga, H. (2024). Métodos propuestos para la evaluación de datos de precipitación medidos en estaciones automáticas. Nota Técnica SMN N° 2024-167. Servicio Meteorológico Nacional.

Hobouchian, M. P., Díaz, G., Vidal, L., García Skabar, Y., Ferreira, L., Maas, M., Rossi Lopardo, M. S., Veiga, H., & Rugna, M. (2021). Ajuste de la estimación de precipitación satelital IMERG con observaciones pluviométricas en Argentina. Nota Técnica SMN N.° 2021-105. Servicio Meteorológico Nacional.

Hong, Y., Hsu, K., Moradkhani, H., & Sorooshian, S. (2006). Uncertainty quantification of satellite precipitation estimation and Monte Carlo assessment of the error propagation into hydrologic response. Water Resources Research, 42(8), W08421. https://doi.org/10.1029/2005WR004398.

Muller, C. L., Chapman, L., Johnston, S., Kidd, C., Illingworth, S., Foody, G., Overeem, A., & Leigh, R. R. (2015). Crowdsourcing for climate and atmospheric sciences: Current status and future potential. International Journal of Climatology, 35(11), 3185–3203. https://doi.org/10.1002/joc.4210.

Robledo, F., Spinoso, N., Hernández, V., Vera, C., Osman, M., Díaz, L., Fossa Riglos, F., Ortiz de Zárate, M. I., Rolla, A., & Ruscica, R. (2018). Co-diseño de una red comunitaria de monitoreo de lluvia en el departamento Bermejo, Chaco, Argentina. En 4.º Encuentro de Investigadores en Formación en Recursos Hídricos (IFRH 2018). Instituto Nacional del Agua (INA), Ezeiza, Argentina.

DETECCIÓN Y CORRECCIÓN DEL EFECTO FIN DE SEMANA EN LAS SERIES DIARIAS DE PRECIPITACIÓN

José Antonio GUIJARRO PASTOR

Retirado de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), Palma de Mallorca. Miembro del Expert Team on Data Development and Stewardship de la Organización Meteorológica Mundial (OMM)

jaguijarro21@gmail.com

RESUMEN

Las series históricas de precipitación diaria, medidas en pluviómetros tipo Hellmann, pueden contener acumulaciones anómalas por ausencias sistemáticas de observación no declaradas en fines de semana. En este trabajo se presenta un método para detectar esos casos mediante el estudio de las diferencias entre las frecuencias relativas de precipitación nula de cada día de la semana para, una vez detectados, desagregar las precipitaciones acumuladas mediante la función homogen del paquete de R climatol.

Palabras clave: efecto de fin de semana, desagregación diaria de precipitación acumulada.

ABSTRACT

Historical series of daily precipitation, measured in Hellmann-type rain gauges, may contain anomalous accumulations due to systematic, unreported absences of observation on weekends. This work presents a method to detect these cases by studying the differences between the relative frequencies of zero precipitation of each day of the week to, once detected, disaggregate the accumulated precipitation using the homogen function of the R climatol package.

Key words: weekend effect, daily disaggregation of accumulated rainfall.

INTRODUCCIÓN

Las observaciones manuales de precipitación se han realizado tradicionalmente midiendo el agua acumulada en pluviómetros Hellmann o similares. Esto implica que, cuando el observador no ha podido realizar la lectura durante uno o más días consecutivos, la siguiente medida incluirá la precipitación total de esos días. Cuando el observador informa de estos incidentes, a las observaciones faltantes se les puede asignar un código de acumulación en la serie de precipitación (-4 en la Base Nacional de Datos Climatológicos de AEMET) para que quede constancia de ello.

El problema radica en que estas acumulaciones impiden la correcta evaluación de parámetros estadísticos como la precipitación máxima diaria, la frecuencia de días con precipitaciones superiores o inferiores a determinados umbrales o el análisis de fenómenos extremos como inundaciones o sequías. La función *homogen* del paquete de R *climatol* provee una solución cuando se ejecuta asignando al parámetro *cumc* el valor del código de acumulación utilizado. De esta manera, *homogen* redistribuirá la precipitación acumulada entre los días marcados con dicho código proporcionalmente a los valores estimados a partir de estaciones cercanas para, sin substituir los valores en la base de datos, posibilitar su uso en los mencionados análisis estadísticos.

Sin embargo, en ocasiones, algunas estaciones pueden omitir sistemáticamente observaciones durante los fines de semana sin notificarlo, con lo que aparecerán como ceros en las series digitalizadas, mientras que la primera observación realizada tras esas omisiones acumulará la precipitación de ese día y los anteriores. Esto se ha reportado en Australia (Viney et al., 2004), Brasil (Sugahara et al., 2010) y Bolivia y Perú (Hunziker et al., 2017), sugiriendo que puede darse en series de observaciones manuales de precipitación en cualquier otro país. Mientras que Aryal et al. (2009) optaron por prescindir de las series problemáticas, Gallant et al. (2007) trataron las acumulaciones como datos ausentes, y Hennessy et al. (1999) dividieron el valor acumulado entre los días correspondientes. Esto último puede tener sentido en áreas con precipitaciones frecuentes, pero no en climas áridos con precipitaciones irregulares. Este trabajo presenta una metodología para desagregar esos datos acumulados de forma más realista, con objeto de que se puedan incorporar al análisis de las series de precipitación diaria.

METODOLOGÍA

2.1. Frecuencias teóricas de días secos

Un primer intento para calcular las frecuencias teóricas de días sin precipitación se llevó a cabo generando frecuencias equiprobables de precipitación nula en cada día de la semana usando la distribución uniforme, con el objetivo de obtener umbrales de confianza que permitan detectar las observaciones faltantes que aparezcan como

ceros en las series de precipitación diaria. Mediante un proceso de Montecarlo se calcularon cuantiles de diferencias entre las frecuencias relativas simuladas de ceros de cada día de la semana con la media de 1, 2 y 3 días anteriores para distintas probabilidades, y se les ajustó un modelo de regresión múltiple. Este modelo se probó con 30 series diarias de precipitación de Eslovenia procedentes del proyecto INDECIS que, al estar generadas a partir de la simulación histórica 1950-2005 del Modelo Climático Atmosférico Regional versión 2 del KNMI, deben estar libres de acumulaciones espurias de fin de semana. Sin embargo, la detección de muchos casos de acumulación indicó que el método usado no era adecuado.

2.2. Frecuencias de días secos en las series modeladas de Eslovenia

Ante los malos resultados anteriores, se procedió a usar las frecuencias empíricas de días secos generados por el modelo climático en la zona de Eslovenia, que presentan un promedio del 39 % de días sin precipitación. Dado que el porcentaje de días secos podría influir en la probabilidad de detectar diferencias anómalas de ceros entre cualquier día de la semana y 1, 2 o 3 días anteriores, se prepararon diferentes versiones de ese conjunto de datos con un 50, 60, 70, 80 y 90 % de días secos.

A continuación se calcularon los cuantiles con probabilidades 0,1; 0,05; 0,02; 0,01; 0,005; 0,002; 0,001; 0,0005; 0,0002 y 0,0001 y, comprobada la escasa influencia del número de días previos (1, 2 o 3), se ajustó mediante regresión múltiple una nueva función general, eliminando las variables no significativas mediante pasos bidireccionales, con lo que se obtuvo la siguiente ecuación (R^2 ajustado = 0,9838, RMSE = 0,0222):

$$D=-1{,}065+5{,}139\cdot X+1{,}436\cdot 10\text{-}2\cdot Y+2{,}470\cdot 10\text{-}2\cdot \log(X)-14{,}28\cdot X2-3{,}732\cdot 10\text{-}5\cdot Y2-4{,}360\cdot 10\text{-}2\cdot XY$$

siendo D las diferencias, X las probabilidades e Y las frecuencias anuales de días secos.

Esta ecuación se implementó en una función *weekendaccum* añadida al paquete de R *climatol* desde la versión 4.3-1.

RESULTADOS

La nueva función se probó con tres de las series modeladas de Eslovenia para el período 1981-1995, poniendo a cero las precipitaciones de los sábados de 1986 a 1990 en una estación y las de los viernes y sábados de 1989 a 1992 en otra. Los resultados para probabilidades de 0,01; 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1; 2; 5 y 10 %, proporcionados a la función mediante el parámetro wdsl (acrónimo de *Week Day Significant Level*) se pueden ver en la Tabla 1.

wdsl	**Detección***
0,01 a 0,2	Ningún falso positivo
0,5 a 2	Un año con falsos positivos
5	Tres años con falsos positivos
10	Muchos falsos positivos
(Los datos anulados se detectaron correctamente en todos los casos)*	

Tabla 1: Resultados de la aplicación de la función weekendaccum a tres series modeladas de Eslovenia a las que se anularon precipitaciones de fines de semana en algunos años. Fuente: elaboración propia.

La función weekendaccum, que realiza la detección año por año, también se probó con las 1883 series completas de datos diarios de precipitación registradas en España durante el período 1991-2000, utilizando el mismo conjunto de probabilidades. El número de años y series con acumulaciones detectadas se muestra en la Tabla 2.

wdsl	0.01	0.02	0.05	0.1	0.2	0.5	1	2	5	10
Años	26	26	32	37	43	66	140	357	1457	1188
Series	8	8	9	11	15	33	94	280	970	814

Tabla 2: Resultados de la aplicación de la función weekendaccum a 1883 series Españolas. Fuente: elaboración propia.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Las pruebas efectuadas con las series modeladas han detectado correctamente los días secos insertados con niveles de significación *wdsl* de 0,01 (valor por defecto) y 0,02, si bien han dado falsos positivos con *wdsl* >= 0,05. Estas series corresponden a un clima mediterráneo con cierta orografía, lo que puede restar validez para aplicar la función a otras zonas, pero en cualquier caso ésta realiza primeramente un diagnóstico, y solo tras la revisión del operador procederá a cambiar los ceros anómalos por el código de acumulación indicado.

La aplicación a 1883 series españolas ha detectado estos problemas en 26 años repartidos en 8 series con *wdsl* 0,01 y 0,02, aumentando hasta 43 años en 15 de las series con *wdsl* 0,20. Con valores de *wdsl* iguales o superiores a 0,05 el número de detecciones aumenta mucho, pero probablemente incluyendo falsos positivos.

Después de aplicar *weekendaccum*, la función *homogen* procederá a desagregar la precipitación acumulada entre los días correspondientes proporcionalmente a las estimas diarias basadas en la media ponderada de los valores diarios de estaciones vecinas, normalizados por proporción respecto a la media, tal como se explica en el manual del usuario (Guijarro, 2026).

La corrección de precipitaciones diarias producto de acumulaciones espurias evitará sesgos indeseados en el análisis estadístico de las series de precipitación diaria.

REFERENCIAS

Aryal SK, Bates BC, Campbell EP, Li Y, Palmer Mj, Viney NR (2009): Characterizing and Modeling Temporal and Spatial Trends in Rainfall Extremes. *Jour. of Hydrometeorology*, 10:241-253.

Gallant AJE, Hennessy KJ, Risbey J (2007): Trends in rainfall indices for six Australian regions: 1910-2005. Aust. Met. Mag. 56:223-239.

Guijarro JA (2026): *Guía de uso del paquete de R climatol*. https://www.climatol.eu/climatol4.5-es.pdf (accedido el 15/05/2026; disponible también en inglés y francés).

Hennessy KJ, Suppiah R, Page CM (1999): Australian rainfall changes, 1910-1995. Aust. Met. Mag., 48:1-13.

Hunziker S, Gubler S, calle J, *et al*. (2017): Identifying, attributing, and overcoming common data quality issues of manned station observations. Int. J. Climatol., 15 pp., DOI: 10.1002/joc.5037

Sugahara S, Rocha RP, Silveira RPD (2010): Some comments on homogeneity of Brazilian instrumental rainfall data. In Eos Transactions AGU, v. 91, n. 26, Meeting of the Americas Supplement, abst. H41A-01.

Viney NR, Bates BC (2004): It never rains on Sunday: The prevalence and implications of untagged multi-day rainfall accumulations in the Australian high quality data set. *Int. J. Climatol.*, 24(9), 1171-1192.

EFECTO DEL CAMBIO DE PRECISIÓN EN LOS REGISTROS METEOROLÓGICOS SOBRE EL CÁLCULO DE PERCENTILES ELEVADOS

Elsa BARRIO-TORRES[1], Zeus GRACIA-TABUENCA[1], Jesús ASÍN[1], Eva SIERRA[2], Brunilda PALACIO[2], Roberto SERRANO-NOTIVOLI[3]

[1]Dpto. Métodos Estadísticos, Universidad de Zaragoza
[2]Delegación de Aragón, AEMET
[3]Dpto. Geografía y Ordenación del Territorio, Universidad de Zaragoza

e.barrio@unizar.com

RESUMEN

Se analiza el impacto que tienen los cambios en la precisión de los registros de estaciones meteorológicas atendidas por observadores sobre la estimación de la distribución de probabilidad de la precipitación diaria. La metodología se basa en un diseño experimental en el que se comparan los percentiles estimados a partir de una serie de referencia (de máxima calidad) con los obtenidos tras distorsionar dicha serie bajo distintas condiciones de precisión y de umbral mínimo de registro. Además, se evalúa cómo afecta este proceso a los percentiles derivados de series de AEMET que presentan valores distintos del Índice de Precisión del Registro (RPI).

Palabras clave: RPI Índice de precisión, distribución estadística, precipitación diaria, sesgos en percentiles.

ABSTRACT

This study analyzes the impact of changes in the accuracy of weather station records maintained by observers on the estimation of the probability distribution of daily precipitation. The methodology is based on an experimental design in which the percentiles estimated from a reference series (first-class) are compared with those obtained after distorting that series under different conditions of accuracy and minimum recording threshold. Furthermore, the study evaluates how this process affects the percentiles derived from AEMET series that have different values of the Record Precision Index (RPI).

Key words: RPI precision index, statistical distribution, daily precipitation, bias in quantiles.

INTRODUCCIÓN

Las series instrumentales presentan distintos tipos de afecciones que pueden generar sesgos en los registros, ligados a cambios de aparataje, Brunet et al. (2011), o a desgaste, Azorín-Molina et al. (2018). Cuando los registros dependen de personal observador colaborador pueden presentan una variación en la calidad de sus registros ligados a cambio de la persona encargada o a cambio de hábitos. Se requieren herramientas que identifiquen estos cambios y la calidad de los registros, Abaurrea et al (2004). En el caso de los registros de precipitación puede aparecer un cambio en la precisión de las series o en el umbral de detección. Estos cambios y disponer de registros menos precisos puede tener consecuencias para establecer resultados estadísticos, como por ejemplo definir una distribución teórica para la precipitación diaria cuando se produce, o utilizar procedimientos empíricos para estimar valores o periodos de retorno que pueden estar afectados por sesgos ligados a la calidad cambiante de la serie. Este trabajo tiene como objetivo presentar una metodología que evalúe este efecto cuando cambia el umbral de resolución y que pueda ayudar a paliarlos.

DATOS Y METODOLOGÍA

Se ha trabajado con una base de datos de 97 series de precipitación diaria de AEMET, en el periodo 1991-2020, situadas en las regiones de la cuenca del Ebro. Se evalúa el nivel de precisión de cada serie de precipitación con el Índice de Precisión real (RPI), Petrovic (2001). Este índice permite estimar el nivel de precisión de una serie meteorológica a partir de la distribución de los dígitos finales de los registros. El método parte del supuesto de que, en una serie medida con precisión adecuada, los dígitos del 0 al 9 deberían presentarse con frecuencias relativamente homogéneas. Desviaciones importantes respecto de esta distribución pueden indicar redondeos sistemáticos, truncamientos o cambios en los criterios de registro de los datos. Dado que la precisión definida por el INM es de 0,1 mm, se establece el valor 0,15 como límite de precisión óptima. En este sentido, el análisis del RPI en cada año es una herramienta para identificar cambios en el patrón del registro de la información.

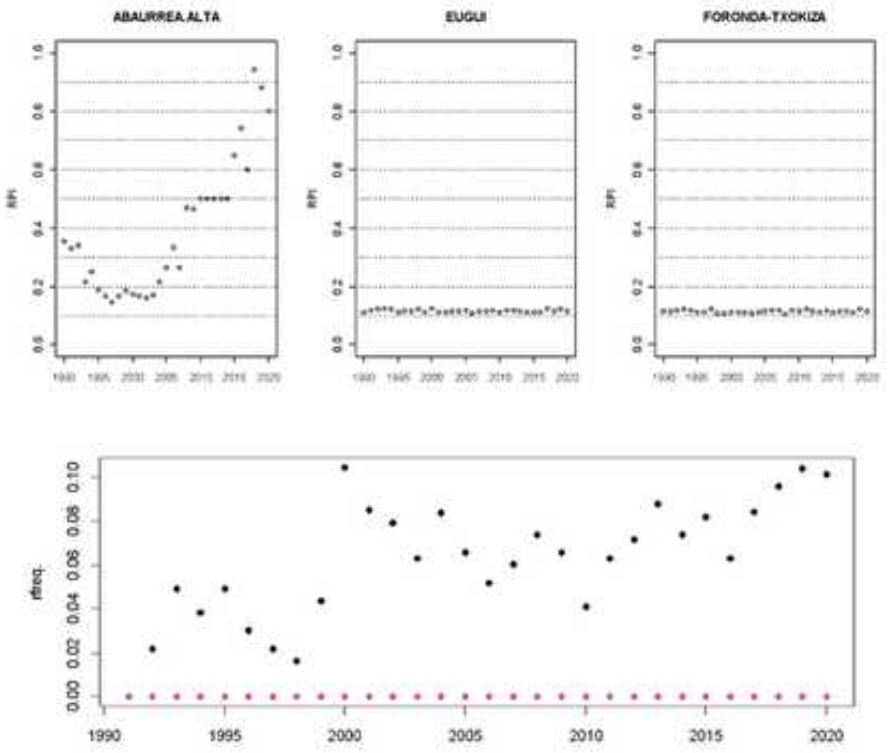
Se estudia el efecto de un cambio en la precisión mediante un diseño experimental en el que se comparan los percentiles estimados a partir de una serie de referencia (de máxima calidad) con los obtenidos con dicha serie transformada bajo distintas condiciones de umbral mínimo de registro. Se deforman los registros para forzar umbrales de detección de 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 y 1mm. Se estiman percentiles elevados en la serie original y en las modificadas. Se comparan los sesgos de las estimaciones obtenidas mediante un procedimiento empírico y mediante un modelo de regresión de cuantiles, para establecer el grado de robustez de cada procedimiento ante cambios en el umbral.

Se estudia la capacidad de un modelo estadístico para obtener estimaciones de los percentiles para una serie cuando el umbral es 0.1mm utilizando como entrada los percentiles estimados a partir de la muestra basada en el umbral de 1mm. Para ello, se ajusta un modelo sobre la base de datos generada con estaciones de máxima precisión.

RESULTADOS

3.1. Resolución de las series de precipitación diaria

Las series han sido clasificadas atendiendo al valor del índice RPI en el periodo 1991-2020, el valor mediano es 0.14, pero un 24% de las series tiene RPI superior a 0.2 y un 8.3% superior a 0.4. La Figura 1 muestra en la parte superior la evolución del RPI en cada año en las series de precipitación de Eugui y Foronda, con buena resolución, y la serie de Abaurrea Alta tiene peor resolución y con oscilaciones. La gráfica central muestra que la evolución anual de la frecuencia relativa del valor 0.1mm en Foronda no ha permanecido estable en el periodo considerado. La gráfica inferior compara la frecuencia relativa de precipitación diaria mayor que distintos umbrales en Foronda y Alsasua, donde se aprecia que las cantidades menores que 0.5 están infrarrepresentadas en Alsasua.



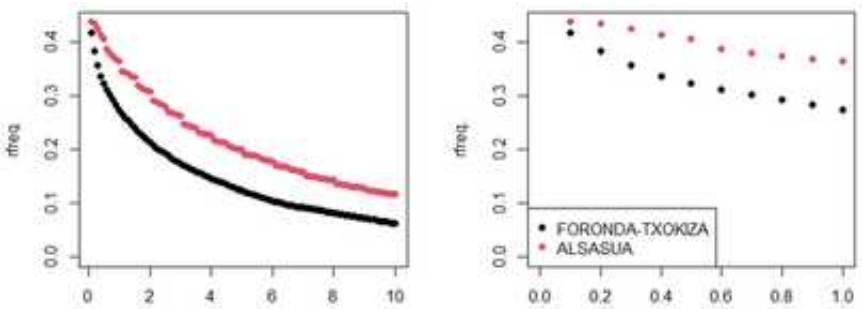
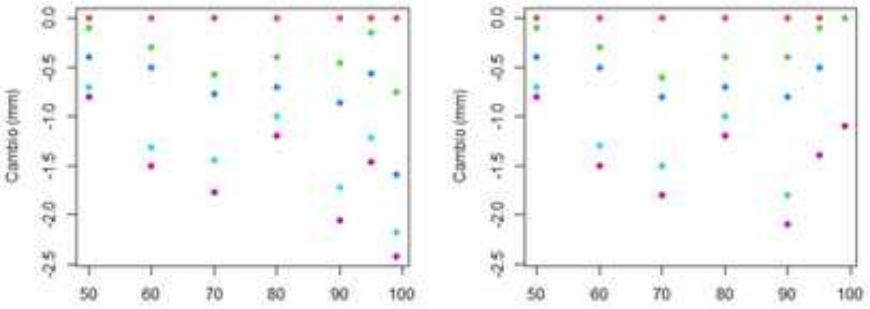


Figura 1. Arriba: Evolución del RPI en cada año en Abaurrea-Alta, Eugui y Foronda. Centro: Evolución de la frecuencia relativa de precipitación en el intervalo [0.1,1] en Abaurrea (rojo) y Foronda (negro). Abajo: frecuencia relativa de precipitación diaria mayor que distintos umbrales en Foronda y Alsasua.

3.2. Efecto sobre percentiles elevados de cambios en la resolución

La Figura 2 y la Tabla 1 resumen el cambio en los percentiles estimados a partir de las series original y modificada, de acuerdo con el diseño experimental, para estaciones de Zaragoza-Aeropuerto y Foronda, Se encuentran menores cambios cuando se estima el percentil con regresión de cuantiles, método que utiliza más información. El cambio en los percentiles no es constante ni tampoco lineal con relación a la probabilidad acumulada o al umbral considerado. La afección del cambio de umbral es mayor en Zaragoza, la estación con menor pluviometría.

Se ha definido un modelo estadístico para estimar los percentiles cuando el umbral es 0.1mm a partir de los obtenidos cuando el umbral es 1mm, aplicado sobre la base generada por los observatorios profesionales. En los resultados preliminares, el modelo requiere efectos no lineales y tiene asociado un R2 ajustado de 98.6%. La gráfica inferior derecha de la Figura 2 muestra el grado de reproducción que obtiene la estimación a partir de los percentiles para 1mm, frente a los percentiles obtenidos de la serie original.



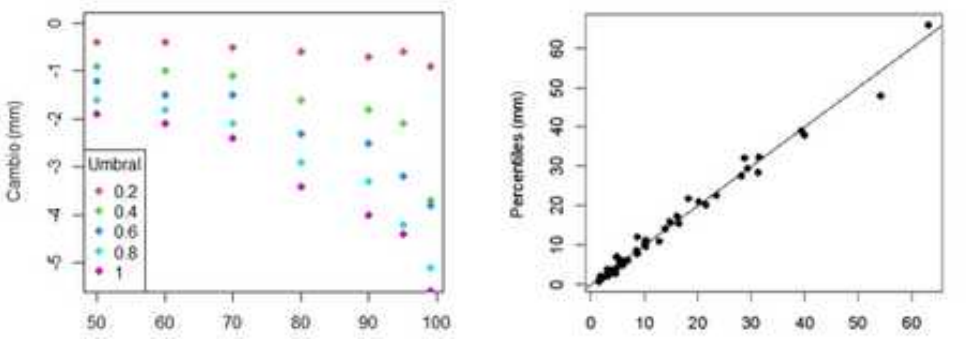


Figura 2. Superior: Cambio en los percentiles estimados para distintos umbrales. experimento aplicado a Foronda, estimación empírica (izda.) y usando regresión de cuantiles (dch.). Inferior izd., experimento en Zaragoza-aeropuerto usando regresión de cuantiles. Inferior dch., percentiles estimados para el umbral 0.1 a partir de los obtenidos para umbral 1mm frente a los obtenidos en la serie original.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El nivel de precisión de series de precipitación diaria de regiones de la cuenca del Ebro en 1991-2010 es variable para las estaciones con colaboradores. Con la metodología propuesta, se han identificado sesgos del orden de 3 mm en la estimación del percentil 90 en estaciones con precipitación escasa. Se ha encontrado que un procedimiento de tipo regresión tiene capacidad para estimar los percentiles de la distribución de precipitación positiva a partir de los obtenidos con la distribución truncada en 1 mm.

	Foronda			Zaragoza Aeropuerto		
Umbral	0.4mm	0.6mm	0.8mm	0.4mm	0.6mm	0.8mm
q50	-0.1	-0.4	-0.7	-0.9	-1.2	-1.6
q6	-0.3	-0.5	-1.3	-1.0	-1.5	-1.8
q70	-0.6	-0.8	-1.5	-1.1	-1.5	-2.1
q80	-0.4	-0.7	-1	-1.6	-2.3	-2.9
q90	-0.4	-0.8	-1.8	-1.8	-2.5	-3.3
q95	-0.1	-0.5	-1.4	-2.1	-3.2	-4.2

Tabla 1: Cambio en el percentil estimado mediante regresión de cuantiles para distintos umbrales de detección, respecto al estimado con la serie original.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo de los proyectos PID2023-150234NB-I00, PID2024-155426OB-I00 y RED2024-153680-T Biostatnet, y del Gobierno de Aragón a través de PROY_T21_24-HIDROGIF y del Grupo de Excelencia E46_23R-Modelos Estocásticos y a la ayuda RYC2021-034330-I financiada por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por "European Union Next Generation EU/PRTR".

REFERENCIAS

Abaurrea, J., Asín, J., Cebrián, A. C., Centelles, A. (2004). Metodología para el control de calidad y homogeneidad de una base de datos de precipitación diaria. En García Codrón, J.C. et al (Eds.). *El clima entre el mar y la montaña*. Asociación Española de Climatología, p. 431-440.

Azorín-Molina, C., Asín, J., McVicar, T. R., Minola, L., López-Moreno, J. I., Vicente-Serrano, S. M., & Chen, D. (2018). Evaluating anemometer drift: A statistical approach to correct biases in wind speed measurement. *Atmospheric Research*, 203, 175-188.

Brunet, M., Asín, J., Sigró, J., Bañón, M., García, F., Aguilar, E., Jones, P. (2011). The minimization of the screen bias from ancient Western Mediterranean air temperature records: an exploratory statistical analysis. *International Journal of Climatology*, 31(12), 1879-1895.

Petrovic, P. (2001). Selection of data sets by quality and its role in climate research. In *Detecting and Modelling Regional Climate Change* (pp. 21-29). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

MODELADO Y PESO DE VARIABLES EN EL MODELADO DE TEMPERATURAS MÁXIMAS Y MÍNIMAS CON MÉTODOS NO-LINEALES PARA SERIES ANUALES

David ORGAMBIDES GARCÍA[1], María José ESTRELA NAVARRO[1], David CORELL CUSTARDOY[1], Juan Javier MIRÓ PÉREZ[2]

[1]*Departamento de Geografía. Universidad de Valencia*
[2] *Departamento de Análisis Geográfico Regional y Geografía Física. Universidad de Alicante*

daorgar@alumni.uv.es, majoesna@uv.es, david.corell@uv.es, jj.miro@ua.es

RESUMEN

El entrenamiento de modelos de temperaturas mediante machine learning requiere de una gran cantidad de datos, pero también de la identificación del modelo más preciso. Empleando una base diaria de 3.794 estaciones en la España peninsular y Baleares, correspondientes a los años 1952 (mínimas) y 2022 (máximas), se han probado distintos modelos no-lineales entrenados a partir de parámetros físicos como la altitud o la distancia al mar, con el objetivo de identificar el modelo con mínimo error. Aquel con el mejor resultado es el Support Vector Machine gaussiano, con un RMSE promedio de 1,63 grados para las máximas, y de 1,53 grados para las máximas. Las variables más importantes fueron la latitud y la altitud. Estas técnicas permiten generar mapas a detalle de temperaturas diarias.

Palabras clave: regresión, modelo no-lineal, temperatura, error, cambio climático.

ABSTRACT

The training of temperature models using machine learning methods requires a large amount of data, as well as the correct identification of the most accurate model. A daily data series of 3,794 weather stations for peninsular Spain and the Balearics, corresponding to the years 1952 (minimums) and 2022 (maximums), has been used to train several non-linear models from physical parameters such as altitude or distance to the coast, with the intent to identify the model with the minimum error. Said model would correspond to a gaussian Support Vector Machine, with an average RMSE of 1.63 degrees for minimums and 1.53 for maximums. The most important variables were latitude and altitude. These techniques allow for the creation of detailed, high-resolution daily temperature maps.

Key words: Regression, non-linear models, temperature, error, climate change.

INTRODUCCIÓN

El estudio de la climatología a partir de datos de estaciones se enfrenta al problema de la dispersión de datos. Las estaciones recogen datos puntuales que no son fácilmente extrapolables, pero se encuentran en un medio físico (altitud, latitud…) que permite entrenar modelos de interpolación y generar mapas de variables climáticas a una resolución determinada. Existen dos técnicas principales, la interpolación espacial (por ejemplo, kriging), o modelos de regresión (machine learning) con una gran variedad de métodos de predicción basados. Ambas técnicas tienen variantes lineales (más simples) y no-lineales.

En la actualidad, existen bases de datos interpoladas, si bien su resolución suele rondar los 5 Km (Serrano-Novitoli et al., 2019, Peral García et al., 2017) o superior (Herreta et al., 2019, Copernicus, 2020); y muchos emplean métodos lineales o espaciales que no terminan de captar los efectos de la topografía. El empleo de métodos no-lineales permitiría estudiar con mayor los cambios en la temperatura en zonas de montaña, donde se han observado los cambios más intensos en temperaturas (Miró et al., 2016). En el presente trabajo se utilizan diversos métodos de machine learning para encontrar el modelo con menor error, con el objetivo de emplearlo para generar una serie temporal de mapas.

METODOLOGÍA

En este trabajo se emplea una serie de 3.794 estaciones en la España peninsular e islas Baleares, con datos diarios interpolados temporalmente (Miró et al., 2017) de temperatura máxima y mínima para los años 2022 y 1952 respectivamente. Se realizan pruebas con modelos de machine learning, y mediante un método de 5 k-folds (4 de entrenamiento y 1 de testeo) se estima la precisión mediante el RMSE (Root Mean Square Error).

Los modelos emplean variables físicas para su entrenamiento, siendo estas: Altitud, Latitud, Longitud, Distancia al mar, Potencialidad de inversión térmica, y Potencialidad de continentalidad, todas con una resolución de 1 Km. A partir de estas variables, extraídas de la ubicación de las estaciones, se modela la temperatura diaria a una resolución de 1 Km. Para estimar la importancia de cada una de las variables se han realizado permutaciones aleatorias de sus valores, de forma que aquellas con mayor error son las que presentan un mayor peso en el modelo.

RESULTADOS

Los mejores modelos en términos de RMSE son aquellos que emplean el denominado Proceso Gaussiano, con un RMSE anual del orden de 1,59 grados. Sin embargo, en los límites de la extrapolación (por ejemplo, zonas de alta montaña) presentan una

reversión de la tendencia, amén de tener un gran coste computacional. Por ende, se ha seleccionado un modelo de Support Vector Machine Gaussiano, con un RMSE de 1,63 grados, pero menos costoso y más preciso en los extremos. Las Figuras 1 y 2 muestran mapas generados con dicho modelo. Otros modelos, como redes neuronales, o métodos de Random Forest presentan errores más elevados, del orden de entre 1,7 y 1,9 grados. La Tabla 1 muestra algunos de los modelos empleados en el caso de las mínimas, con su error y tiempo de computación.



Figura 1. Mapa de mínimas para el 1 de enero de 1952. Fuente: Elaboración propia.



Figura 1. Mapa de máximas para el 24 de junio de 2022. Fuente: Elaboración propia.

Método	Error (RMSE, ºC)	Tiempo de computación anual (h)
Proceso gaussiano exponencial	1,59	11,34
Proceso gaussiano cuadrático	1,63	8,34
SVM gaussiano	1,64	2,09
SVM cúbico	1,75	2,07
Red neuronal ReLU	1,78	1,11
Random Forest Bagged Trees	1,93	1,64

Tabla 1: Errores y tiempo de computación de varios modelos. Fuente: Elaboración propia.

Con respecto al peso de variables, se aprecia que las más importantes son la Latitud, la Altitud y la Longitud; con el resto actuando como variables “de refinado”. La Figura 3 muestra una comparativa del error derivado de la permutación aleatoria de cada variable.

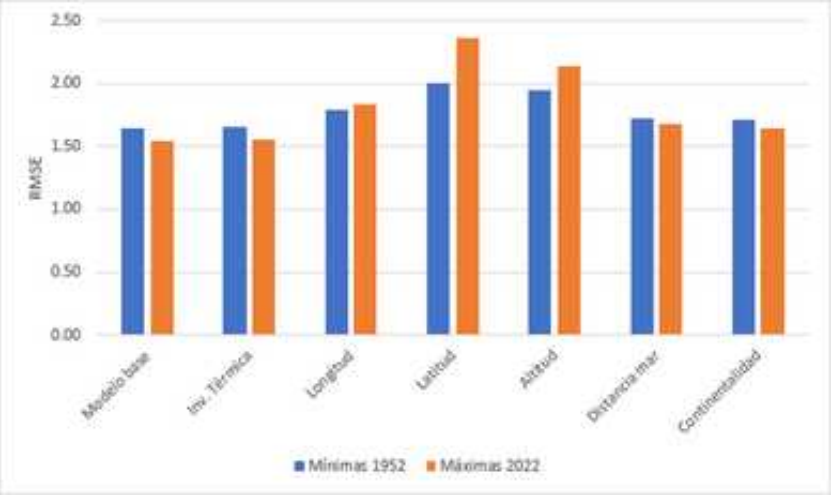


Figura 3. Importancia relativa de las variables medida en función de su influencia sobre el RMSE global. Fuente: Elaboración propia.

DISCUSIÓN

Los modelos empleados superan en resolución a aquellos empleados previamente, pero difieren en la metodología. La metodología planteada emplea métodos no-lineales basados en relaciones entre un número de variables de entrada y un resultado, diferente a interpolaciones espaciales o a modelos lineales. Sin embargo, cuenta con el inconveniente de que el modelo interpola la temperatura de todo el territorio, por lo que el valor de temperatura predicho para una celda de 1x1 Km puede variar con respecto a la temperatura observada por una estación ubicada en dicha celda, aunque los parámetros físicos de la celda y la estación sean idénticos. Esto se debe a que el modelo se entrena con todas las estaciones, por lo que su respuesta a un valor concreto puede diferir del valor observado. Pese a ello, el modelo permite reducir la escala de detalle y generar series de mapas temporales que facilitan un estudio completo del cambio climático a lo largo de una serie temporal.

CONCLUSIONES

La presente metodología permite la generación continuada e iterativa de mapas de temperaturas a alta resolución (1 Km) a partir de datos de estaciones, con un error medio de alrededor de 1,6 grados a lo largo de un año. La resolución espacial propuesta supera a la de otras bases de datos existentes, y permite identificar a

detalle las variaciones térmicas en zonas de alta montaña. Sin embargo, al modelizar todo el territorio, el dato local puede desviarse del valor medido por las estaciones, aunque este fallo tiende a reducirse a lo largo de la serie temporal. Las rejillas generadas pueden emplearse para estudiar todo tipo de variables climáticas derivadas, y entender el cambio climático reciente en la zona de estudio.

REFERENCIAS

Serrano-Notivoli, R., Beguería, S., de Luis, M. (2019). STEAD: a high-resolution daily gridded temperature dataset for Spain. Earth System Science Data, 11, 1171-1188. https://doi.org/10.5194/essd-11-1171-2019

Peral García, C., Navascués Fernández-Victorio, B., Ramos Calzado, P. (2017). Serie de precipitación diaria en rejilla con fines climáticos. Nota técnica 24 de AEMET. https://www.aemet.es/documentos/es/conocermas/recursos_en_linea/publicaciones_y_estudios/publicaciones/NT_24_AEMET/NT_24_AEMET.pdf

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, 1947-1956, https://doi.org/10.5194/essd-11-1947-2019

Copernicus Climate Change Service, Climate Data Store (2020): E-OBS daily gridded meteorological data for Europe from 1950 to present derived from in-situ observations. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). DOI: https://doi.org/10.24381/cds.151d3ec6

Miró, J.J., Estrela, M.J., Caselles, V., Olcina-Cantos, J. (2016). Fine-scale estimations of bioclimatic change in the Valencia region, Spain. Atmospheric Research, 180, 150-164. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.05.020

Miró, J.J., Caselles, V., Estrela, M.J. (2017). Multiple imputation of rainfall missing data in the Iberian Mediterranean context. Atmospheric Research, 197, 313-330. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.07.016

ANÁLISIS DE LA EVOLUCIÓN DE LA ANOMALÍA DE TEMPERATURA EN CANARIAS ENTRE 1970 Y 2024 EN EL CONTEXTO MUNDIAL

María ALONSO LEÓN[1], Luis ÁLVAREZ[1]

[1]*Departamento de Informática y Sistemas, Universidad de Las Palmas de G.C.*

maria.alonso158@alu.ulpgc.es, lalvarez@ulpgc.es

RESUMEN

Este estudio cuantifica las tendencias de la anomalía de temperatura en 1970–2024 para ocho áreas: tres globales (global, hemisferios norte y sur), cuatro estaciones canarias (Izaña, Tenerife/Los Rodeos, S.C. de Tenerife, Gran Canaria/Gando) y una media regional (Canarias), utilizando datos de HadCRUT5 y la AEMET. Se ajustan modelos de regresión lineal (OLS) a tres escalas temporales — serie mensual completa, media anual y serie por mes — con diagnósticos de normalidad, homocedasticidad, autocorrelación, intervalos de confianza HAC robustos y estimación no paramétrica (pendiente de Sen, test de Mann-Kendall). Todas las áreas muestran calentamiento significativo (Mann-Kendall $p \approx 0$). Las estaciones canarias (+3.2 a +3.5 °C/siglo) presentan tasas comparables al hemisferio norte (~3.42 °C/siglo). Yeo-Johnson y la regresión segmentada mejoran el RMSE en menos de un 2% (respaldando el ajuste lineal) y dan una señal débil de aceleración globalmente y desaceleración en Canarias que debe interpretarse con cautela al ser mínima la mejora del RMSE. La pendiente observada en Canarias (~3.35 °C/siglo) es comparable a la proyección del modelo ACCESS-CM2 en el escenario RCP 7.0 de altas emisiones (3.2 °C/siglo). Una versión extendida de este estudio se encuentra en: https://github.com/MariaAlonsoLeon/TemperatureAnomaly.

Palabras clave: anomalía de temperatura, regresión lineal, Canarias, HadCRUT5, AEMET.

ABSTRACT

This study quantifies temperature anomaly trends over 1970–2024 for eight areas: three global regions (global, Northern and Southern Hemispheres), four Canary Islands stations (Izaña, Tenerife/Los Rodeos, S.C. de Tenerife, Gran Canaria/Gando) and a regional average (Canary Islands), using HadCRUT5 and AEMET data. OLS linear regression models are fitted at three temporal scales — complete monthly series, annual mean and month-by-month series — with normality, homoscedasticity and autocorrelation diagnostics, HAC robust confidence intervals and non-parametric

estimation (Sen slope, Mann-Kendall test). All areas show significant warming (Mann-Kendall p ≈ 0). Canary Islands stations (+3.2 to +3.5 °C/century) exhibit rates comparable to the Northern Hemisphere (~3.42 °C/century). Yeo-Johnson and segmented regression improve RMSE by less than 2% —supporting the linear fit— and provide a weak signal of global acceleration and deceleration in the Canary Islands, which should be interpreted with caution given the minimal RMSE improvement. The observed slope for the Canary Islands (~3.35 °C/century) is comparable to the ACCESS-CM2 climate model projection under the high-emission RCP 7.0 scenario (3.2 °C/century). An extended version of this work is available at: https://github.com/MariaAlonsoLeon/TemperatureAnomaly

Key words: temperature anomaly, linear regression, Canary Islands, HadCRUT5, AEMET.

INTRODUCCIÓN

Este estudio cuantifica las tendencias de la anomalía de temperatura en 1970–2024 para ocho áreas, utilizando datos mensuales de HadCRUT5 (Morice et al., 2021) para las series globales y de la AEMET para las estaciones canarias. La metodología sigue el enfoque de HadCRUT5 y CRUTEM5 (Osborn et al., 2021), que define la anomalía de temperatura como la diferencia mensual entre la temperatura observada y la media de referencia 1961–1990, eliminando el ciclo estacional.

La elección de 1970 como año de inicio se fundamenta en Mudelsee (2019), que demuestra una aceleración del calentamiento desde 1974. Los objetivos son: (i) cuantificar la tendencia mediante regresión lineal (OLS) con diagnóstico robusto, (ii) verificar el ajuste frente a otros métodos y analizar cambios recientes de tendencia, y (iii) analizar la coherencia con las proyecciones de modelos climáticos (SITCAN y CMIP6).

El análisis se realiza en tres escalas temporales: serie mensual completa, media anual y serie por mes. En todas se ajusta $y(t) = \beta_0 + \beta_1 \cdot t + \varepsilon(t)$, donde β_1 cuantifica la tasa de calentamiento en °C/siglo.

METODOLOGÍA

Cada modelo se somete a una batería de diagnósticos estadísticos. Se aplican los tests de Anderson-Darling (AD) para normalidad de los residuos —preferido frente a Shapiro-Wilk por su potencia con muestras grandes— y de Breusch-Pagan (BP) para homocedasticidad. El test de Ljung-Box (LB) evalúa la autocorrelación residual, habitual en series mensuales. Cuando se detecta autocorrelación o heterocedasticidad, se emplea el estimador HAC de Newey-West para obtener

intervalos de confianza robustos. Como alternativas no paramétricas se emplean el test de Mann-Kendall (MK), insensible a outliers, y la pendiente de Sen (Theil-Sen), robusta incluso frente a un 29 % de datos anómalos (Mudelsee, 2019). El indicador de fiabilidad resume seis criterios ($R^2 < 0.10$, IC95 > |pendiente|, AD, BP, LB, MK n.s.); si ninguno falla, el modelo se clasifica como "OK".

Para evaluar el ajuste lineal y detectar cambios de tendencia, se comparan dos métodos aplicados sobre la serie mensual completa: (i) la transformada de Yeo-Johnson, que optimiza una transformación de potencia minimizando el RMSE y permite capturar aceleraciones o desaceleraciones suaves; y (ii) la regresión lineal segmentada (changepoint), con dos tramos unidos en un punto de cambio óptimo (noviembre de 1983).

RESULTADOS

3.1. Series mensuales y media anual

Todas las áreas muestran calentamiento altamente significativo (Mann-Kendall $p \approx 0$). A escala de media anual (Tabla 1), las pendientes oscilan entre +1.75 °C/siglo (hemisferio sur) y +3.52 °C/siglo (Gran Canaria/Gando). La concordancia OLS–Sen confirma ausencia de distorsión por valores atípicos. A escala anual, 6 de 8 áreas cumplen todos los criterios de fiabilidad y los IC OLS y HAC son muy parecidos, por lo que la inferencia clásica resulta fiable. Las pendientes mensuales (convertidas a °C/siglo) son coherentes con las anuales (diferencias < 0.1 °C/siglo).

AREA	Fiab.	R^2	OLS ± IC95	OLS ± IC95 HAC	Sen ± IC95
GLOBAL	OK	0.89	2.86 ± 0.27	2.86 ± 0.29	2.86 ± 0.30
HEMISF. NORTE	OK	0.90	3.42 ± 0.32	3.42 ± 0.33	3.40 ± 0.36
HEMISF. SUR	OK	0.79	1.75 ± 0.25	1.75 ± 0.28	1.77 ± 0.28
CANARIAS	OK	0.58	3.35 ± 0.78	3.35 ± 0.86	3.33 ± 0.79
GC/GANDO	LB	0.57	3.52 ± 0.84	3.52 ± 0.93	3.63 ± 0.85
IZAÑA	OK	0.48	3.40 ± 0.97	3.40 ± 1.01	3.17 ± 0.92
S.C. DE TENERIFE	LB	0.55	3.23 ± 0.81	3.23 ± 0.75	3.15 ± 0.87
TNF/LOS RODEOS	OK	0.40	3.25 ± 1.09	3.25 ± 1.44	3.47 ± 1.11

Tabla 1. Estimación pendientes (°C/siglo) (media anual) para OLS con IC95, IC95 con HAC y estimación robusta con Sen. Fiab.: OK = sin criterios incumplidos; LB = autocorrelación residual. Fuente: elaboración propia.

3.2. Análisis por mes

Las estaciones canarias muestran un perfil estacional marcado, con pendientes máximas en abril–agosto y mínimas en septiembre. El hemisferio norte presenta un perfil estacional diferente, con mayor calentamiento en enero–marzo. De los 96 modelos mensuales, 7 presentan $R^2 < 0.10$, concentrados en Izaña (enero, febrero, noviembre), Tenerife/Los Rodeos (febrero, julio, septiembre) y Canarias (febrero).

3.3. Comparación con otros métodos

La Tabla 2 muestra que tanto la transformada de Yeo-Johnson como la regresión segmentada producen mejoras de RMSE inferiores al 2 % en todas las áreas, lo que respalda la bondad del ajuste lineal para describir la tendencia media. El punto de cambio óptimo se sitúa en noviembre de 1983. Las series globales presentan, para las pendientes, ratios YJ/OLS de 1.15–1.28 y ratios CP/OLS de 1.02–1.08, sugiriendo una posible aceleración moderada. En contraste, las estaciones canarias muestran ratios YJ/OLS de 0.88–1.01 y ratios CP/OLS de 0.58–0.96, compatibles con una señal débil de desaceleración.

AREA	RMSE OLS	Mej. YJ (%)	Mej. CP (%)	OLS ± IC95 HAC	Ratio YJ/OLS	Ratio CP/OLS
GLOBAL	0.254	1.02	0.71	2.86 ± 0.28	1.27	1.07
HEMISF. NORTE	0.337	0.89	0.79	3.41 ± 0.30	1.28	1.08
HEMISF. SUR	0.220	0.23	0.03	1.75 ± 0.28	1.15	1.02
CANARIAS	0.921	0.02	0.74	3.37 ± 0.69	0.96	0.80
GC/GANDO	0.795	0.21	1.14	3.54 ± 0.73	0.88	0.79
IZAÑA	1.555	0.00	0.17	3.41 ± 0.91	1.00	0.84
S.C. DE TENERIFE	0.772	0.00	0.04	3.23 ± 0.65	1.01	0.96
TNF/LOS RODEOS	1.176	0.02	1.80	3.26 ± 0.92	0.97	0.58

Tabla 2. Comparación de métodos (serie mensual completa). RMSE con OLS, % mejora RMSE con Yeo-Johnson (YJ) y changepoint (CP), pendiente con OLS ± IC95 HAC, ratios YJ/OLS y CP/OLS de variación de la pendiente. Fuente: elaboración propia.

DISCUSIÓN

El hemisferio norte se calienta a +3.42 °C/siglo, casi el doble que el hemisferio sur (+1.75 °C/siglo). Canarias (+3.23 a +3.52 °C/siglo) participa plenamente del calentamiento hemisférico. La autocorrelación residual de todas las series mensuales se corrige mediante el IC HAC, que duplica aproximadamente el IC OLS en las estaciones con mayor variabilidad. A escala anual, la autocorrelación es marginal y la inferencia OLS es suficiente.

La escasa mejora de RMSE (< 2 %) obtenida por los modelos más complejos de Yeo-Johnson y la regresión segmentada indica que la no linealidad presente en las series es muy débil. La concordancia de estos modelos sugiere una posible aceleración a escala global y una señal débil de desaceleración en Canarias. Esta diferencia podría relacionarse con factores regionales, como cambios en los vientos alisios o el upwelling costero. No obstante, al ser mínima la mejora del RMSE, la señal debe interpretarse con cautela.

La pendiente estimada para Canarias (~3.35 °C/siglo) es comparable a la proyección del modelo ACCESS-CM2 bajo el escenario RCP 7.0 de altas emisiones (3.2 °C/siglo; AEMET, 2024), y se sitúa entre las proyecciones del SITCAN de 1.7 °C/siglo (RCP 4.5) y 3.4 °C/siglo (RCP 8.5) de Expósito et al. (2015). Esto indica que el calentamiento actual sigue una trayectoria compatible con emisiones elevadas.

CONCLUSIONES

1) Calentamiento significativo en todas las áreas y escalas. Las 8 áreas presentan tendencia positiva con Mann-Kendall $p \approx 0$ y pendientes históricas (media anual) entre +1.75 y +3.52 °C/siglo. 2) Ajuste lineal respaldado. Las mejoras de RMSE de los métodos alternativos son inferiores al 2 %, confirmando que la regresión lineal captura adecuadamente la tendencia. 3) No linealidad reciente débil. Ambos métodos señalan una posible aceleración reciente moderada a escala global (ratios 1.02–1.28) y una señal débil de desaceleración en Canarias (ratios 0.58–1.01). 4) Estacionalidad diferenciada. Las estaciones canarias muestran máximos en primavera-verano, mientras el hemisferio norte los presenta en invierno. 5) Coherencia con modelos climáticos. La pendiente observada en Canarias (~3.4 °C/siglo) es comparable a la proyección RCP 7.0 del modelo ACCESS-CM2 (3.2 °C/siglo). 6) Robustez. La batería de diagnósticos y el indicador de fiabilidad refuerzan la confianza en las conclusiones.

AGRADECIMIENTOS

A la Delegación Territorial en Canarias de la AEMET por facilitar los datos de las estaciones canarias.

REFERENCIAS

Agencia Estatal de Meteorología. (2024). *Proyecciones climáticas regionalizadas para el siglo XXI (CMIP6). Escenarios-PNACC. Modelo ACCESS-CM2, método RegBA*. AEMET.

Expósito, F. J., González, A., Pérez, J. C., Díaz, J. P., & Taima, D. (2015). High-resolution future projections of temperature and precipitation in the Canary Islands. *Journal of Climate, 28*(19), 7846–7856. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0030.1

Morice, C. P., et al. (2021). An updated assessment of near-surface temperature change from 1850: The HadCRUT5 dataset. *JGR: Atmospheres, 126*, e2019JD032361. https://doi.org/10.1029/2019JD032361

Mudelsee, M. (2019). Trend analysis of climate time series: A review of methods. *Earth-Science Reviews, 190*, 310–322. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.12.005

Mulomba Mukadi, P., & González-García, C. (2021). Time series analysis of climatic variables in peninsular Spain: Trends and forecasting models for data between 20th and 21st centuries. *Climate, 9*(7), 119. https://doi.org/10.3390/cli9070119

Osborn, T. J., et al. (2021). Land surface air temperature variations across the globe updated to 2019: The CRUTEM5 dataset. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 126*, e2019JD032352. https://doi.org/10.1029/2019JD032352

SITCAN — Consejería de Transición Ecológica y Energía, Gobierno de Canarias. (2026). *Portal del Cambio Climático de Canarias*. https://cambioclimatico.sitcan.es/

EMOWA, UNA BASE DE DATOS PARA ESTUDIAR EL CLIMA HISTÓRICO DEL SAHEL

Fernando S. RODRIGO[1]

[1]*Dpto. Química y Física, Universidad de Almería*

frodrigo@ual.es

RESUMEN

Las sequías y hambrunas que afectaron al Sahel desde los años 60 del siglo pasado han incentivado el estudio de las variaciones climáticas en África Occidental durante las últimas décadas. Este área es una de las regiones más vulnerables al cambio climático y la variabilidad del clima debido a sus características geográficas, alta dependencia de la agricultura como principal fuente de recursos, y baja capacidad adaptativa ante los riesgos ambientales. El breve registro instrumental disponible (principalmente desde finales del siglo XIX) no proporciona una serie temporal suficientemente larga para comprender la variabilidad climática natural en la zona. En este trabajo se presenta la base de datos "Early Meteorological Observations in Western Africa" (EMOWA), que recopila informes de factorías coloniales, tratados médicos sobre las condiciones sanitarias en la zona, y relatos de expediciones científicas, donde se registraban observaciones meteorológicas cualitativas e instrumentales desde el siglo XVIII hasta las primeras décadas del XIX. Se muestran algunos ejemplos que muestran la utilidad de estas fuentes de datos.

Palabras clave: Climatología histórica, primeras series instrumentales, Sahel.

ABSTRACT

Droughts and famines that affected the Sahel since the 1960s have promoted the study of climatic variations in Western Africa during the last decades. This area is a climatic change hot spot due to its geographical characteristics, agriculture as the main economic activity, and low resilience against environmental risks. The brief meterorological instrumental record (since the end of the 19th century) does not provide long time series to understand the natural climatic variability in the region. In this work the data base "Early Meteorological Observations in Western Africa" (EMOWA), is presented. This data base compiles meteorological obsetrvations, instrumental records and qualitative descriptions, from colonial reports, medical treaties, and narrative of scientific expeditions since the 18th century to the first decades of the 19th century. Some examples showing the utility of these data sources are shown.

Key words: Historical climatology, early instrumental series, Sahel.

INTRODUCCIÓN

Las sequías y hambrunas que afectaron al Sahel desde los años 60 del siglo pasado incentivaron los estudios sobre la variabilidad climática en África Occidental (Nicholson y Webster, 2007). El breve registro instrumental (desde finales de los 1880s) no proporciona series de la suficiente longitud para comprender el rango de variabilidad climática natural y las interacciones a largo plazo (Olago y Odada, 2004). Los datos necesarios para determinar esta variabilidad son, pues, escasos, debido a la falta de largas series instrumentales, y al potencial limitado de datos proxy de alta resolución, como los anillos de árboles (Verschuren et al., 2000; Brooks, 2004). La interpretación de la variabilidad climática durante el periodo histórico se basa, pues, principalmente en datos arqueológicos (Mayor et al., 2005), estudios geológicos de lagos y ríos (Nicholson y Yin, 2001), y documentos históricos (Norrgard, 2015). El conocimiento del clima de periodos previos a finales del siglo XIX se centra en el Sahel, la costa de África Occidental, y áreas del sur del continente. Pocas fuentes contienen registros meteorológicos sistemáticos. En general se trata de descripciones genéricas y referencias a sucesos extremos (Nash y Hannaford, 2020).

Sin embargo, podemos acudir a informes de factorías coloniales, relatos de expediciones científicas, y tratados médicos sobre la salubridad de estas regiones, para intentar compilar un conjunto de datos que nos ayuden a revelar las condiciones climáticas del área en el pasado. En los últimos años se han puesto en marcha distintas iniciativas al objeto de compilar los registros meteorológicos instrumentales previos a 1850, en distintas regiones del globo (Brönnimann et al., 2019).

En este trabajo, presentamos la base de datos EMOWA (Early Meteorological Observations in Western Africa), donde, hasta la fecha, hemos compilado un conjunto de observaciones meteorológicas de África Occidental desde 1738 hasta 1841. Esta base de datos, disponible en el repositorio de la Universidad de Almería (http://repositorio.ual.es/handle/10835/10636), ha sido integrada en la base de datos Global Early Instrumental Monthly Meteorological Multivariable Database (HCLIM, https://doi.pangea.de/10.1594/PANGEA.940724, Lundstad et al., 2023).

LA BASE DE DATOS “EMOWA”

Los datos meteorológicos instrumentales eran compilados usualmente como un apéndice a los textos, en forma de tablas o diarios meteorológicos. La base de datos está formada por un conjunto de series meteorológicas, normalmente breves, fragmentarias y sin características homogéneas: cada observador utilizaba diferentes instrumentos, escalas y procedimientos de medida, sin continuidad en el tiempo.

Por ello está estructurada mediante un fichero EXCEL donde cada hoja recopila los datos obtenidos a partir de una fuente particular. El formato de cada hoja es el siguiente:

- ID: Identificador del fichero.
- Period: Periodo de tiempo cubierto
- Resolution: Resolución temporal de los datos (subdiaria, diaria, mensual, estacional, anual)
- Observer: Nombre del observador
- Location: Localización de las observaciones (latitud, longitud)
- Meteorological variables: Lista de variables meteorológicas (incluyendo escalas y unidades)
- Data source: Información bibliográfica sobre la fuente de datos.

Y, luego, en columnas: Año-Mes-Día-Hora-Variable 1- Variable 2-….

Algunas fuentes de datos incluyen comentarios cualitativos sobre las condiciones meteorológicas, que son también incluidos. La figura 1 muestra la localización de los lugares de observación registrados, para el periodo total desde 1738 hasta 1841.

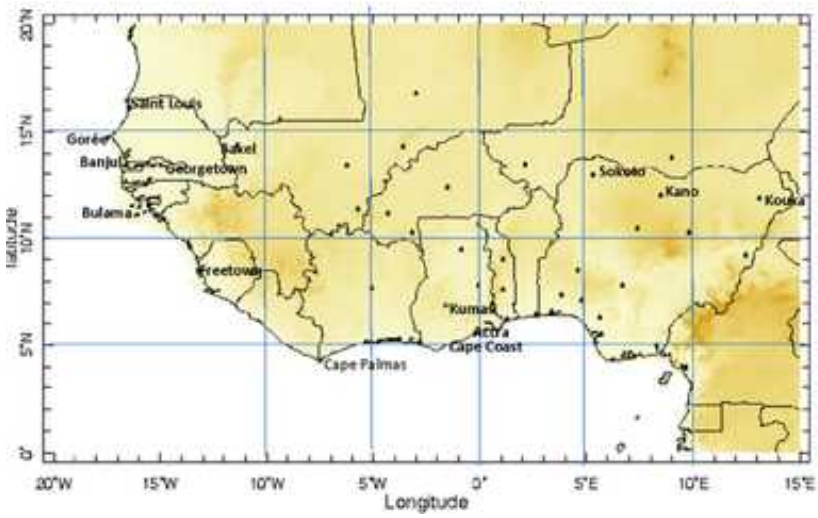


Figura 1. Localización de estaciones con observaciones meteorológicas recopiladas en EMOWA (los puntos indican lugares con modernas series meteorológicas)

Podemos hacernos una idea de la fragmentación y dispersión de los datos registrados viendo la cobertura temporal y las variables estudiadas en localizaciones concretas. Esto es lo que se muestra en la Tabla 1, donde, a título de ejemplo, se han seleccionado las estaciones de Saint Louis, Freetown, Cape Coast y Kano. Sólo se especifican los años con observaciones.

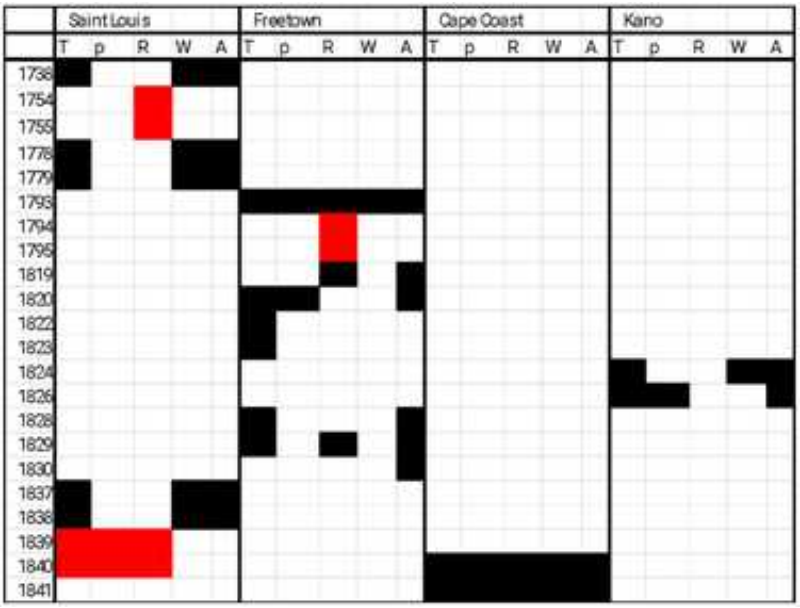


Tabla 1. Años con datos instrumentales en cuatro estaciones representativas. T=temperatura; p=presión atmosférica; R=lluvia; W=dirección del viento; A=descripciones cualitativas. Negro: datos diarios; Rojo: datos mensuales.

Errores aleatorios pueden haberse introducido en los textos originales y en el proceso de digitalización, tales como erratas, trasposición de columnas, inconsistencia de fechas, desaparición de comas decimales, etc (Schrier y Jones, 2008). Por tanto, todas las series fueron sometidas a inspección visual para identificar errores. Además, se aplicaron dos tests para confirmar la fiabilidad de los datos: test de tolerancia (datos diarios que exceden en valor absoluto 4 desviaciones típicas de la serie completa se eliminan) y test de consistencia temporal (cuando la diferencia entre valores consecutivos es ≥10C, Domínguez-Castro et al., 2017). En la base de datos, aunque se ha intentado reproducir los datos originales de manera literal, estos errores, cuando se han detectado, han sido corregidos. Un problema importante es que la información sobre el metadata es incompleta o inexistente. Las series, pese a su brevedad, pueden presentar problemas de homogeneidad, bien porque el observador cambiara de instrumento, bien por cambios en la localización y condiciones de exposición de los instrumentos, o por cambios en las horas del día en las que se tomaron las medidas. Todos estos problemas deben tenerse en cuenta a la hora de intentar reconstruir las series e interpretar los posibles resultados.

EJEMPLOS

A pesar de su brevedad, su carácter fragmentario, y sus problemas de homogeneidad, estas series pueden ser útiles para mejorar la calidad de las reconstrucciones y reanálisis a gran escala (Brönnimann et al., 2019), para calibrar y/o validar otros datos proxy (Büntgen et al., 2011) y para el análisis de sucesos extremos particularmente relevantes (Domínguez-Castro et al., 2013). Un primer intento de análisis de las series correspondientes al siglo XVIII ya fue presentado anteriormente (Rodrigo y Millán, 2022). En esta sección presentamos un ejemplo obtenido a partir de los datos de la primera expedición de Denham y Clapperton (1826) a la actual Nigeria, donde los datos diarios han sido integrados para obtener datos mensuales, y estos se comparan con las series instrumentales modernas correspondientes al periodo 1981-2010 (disponibles en http://worldweather.wmo.int).

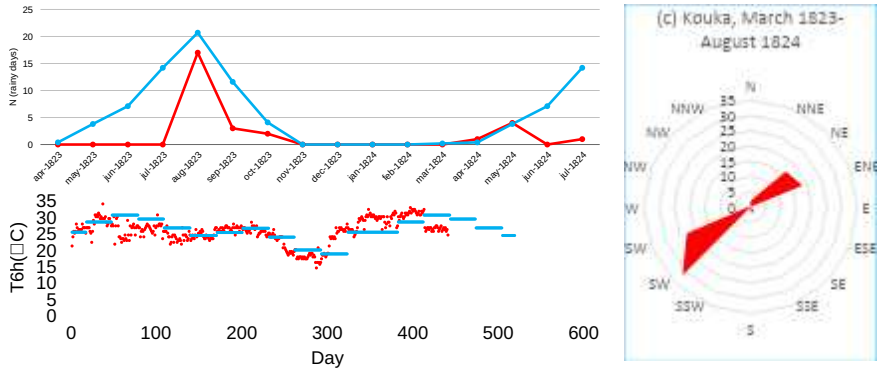


Figura 2. Ejemplos de series recuperadas. (a) Temperatura diaria a las 6 h; (b) Número mensual de días de lluvia; (c) Rosa de los vientos en Kouka (actual Nigeria) durante el periodo desde el 15 de Marzo de 1823 al 15 de Agosto de 1824.Rojo: serie histórica; Azul: medias mensuales del periodo instrumental 1981-2010.

La Figura 2(a) muestra como ejemplo los registros de temperatura diaria medida en Kouka (actual Nigeria) a las 6 horas (en azul media mensual de las temperaturas mínimas diarias del periodo instrumental 1981-2010). La Figura 2(b) contabiliza, a partir de la misma fuente, el número mensual de días de lluvia, mostrando el ciclo anual, con un claro máximo en los meses de verano. La Figura 2(c) muestra la rosa de los vientos para el mismo periodo, donde puede apreciarse el predominio de los vientos del NE y ENE, correspondiente a los meses del invierno boreal (Diciembre y Enero fundamentalmente), y el de los vientos del SW, correspondientes a los meses del verano boreal (Julio y Agosto). Puede apreciarse cómo estos registros, en términos generales, reproducen adecuadamente el ciclo anual, mostrando el régimen monzónico de este área del planeta, con veranos lluviosos y predominio de vientos de origen atlántico, e inviernos secos, con la aparición del “harmattan”, o viento del NE procedente del Sáhara. Así pues, en primera aproximación, podemos confiar en la fiabilidad de los datos recuperados.

CONCLUSIONES

Por supuesto, EMOWA no es exhaustiva, aún hay muchas fuentes documentales inexploradas. Pero el trabajo hasta ahora realizado ofrece resultados esperanzadores, pues los registros obtenidos reflejan bien las condiciones climáticas generales del área. El análisis de los datos, en la medida en que vaya completándose la cobertura espaciotemporal de los mismos, permitirá analizar la variabilidad climática de un área especialmente sensible a los efectos del cambio climático, como es el Sahel y la costa occidental del continente africano. Este es el objetivo de futuros trabajos.

REFERENCIAS

Brönnimann, S., Allan, R., Ashcroft, L. (2019) Unlocking pre-1850 instrumental meteorological records. A Global Inventory. *BAMS* ES389-ES413. doi: 10.1175/BAMS-D-19-0040.I

Brooks, N. (2004) Drought in the African Sahel: long term perspectives and future prospects. *Working Paper* No. 61, Tyndall Centre, Norwich, United Kingdom

Büntgen, U. (2011) 2500 years of European climate variability and human susceptibility. *Science* 331: 578-582. doi: 10.1126/science.1197175

Denham, D., Clapperton, H. (1826). *Narrative of Travels and Discoveries in Northern and Central Africa*. Cummings, Hilliard & Co., Boston. http://www.google.books.com.

Domínguez-Castro, F. (2013) The first meteorological measurements in the Iberian Peninsula: evaluating the storm of November 1724. *Climatic Change*: 118, 443-455. doi: 101007/s10584-012-0628-9

Domínguez-Castro, F., Vaquero, J.M., Rodrigo, F.S. (2017) Early meteorological records from Latin-America and the Caribbean during the 18th and 19th centuries. *Scientific Data* 4:170169. doi: 10.1038/sdata.2017.169

Lundstad, E., Brugnara, Y., Pappert, D. (2022) Global Historical Climate Database-HCLIM. *Scientific Data* 10:44. doi: 10.1038/s41597-01919-w

Mayor, A. (2005) Population dynamics and paleoclimate over the past 3000 years in the Dogon Country, Mali. *Journal of Anthopological Archaeology*, 24, 25-61.

Nash, D.J., Hannaford, M.J. (2020) Historical climatology in Africa: a state of the art. *PAGES Magazine* 28: 42-43. Doi:10.22498/pages.28.2.42

Nicholson, S.E., Webster, P.J. (2007) A physical basis for the interannual variability of rainfall in the Sahel. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 133: 2065-2084. doi:10.1002/qj.104

Nicholson, S.E., Yin, X. (2001) Rainfall conditions in equatorial East Africa during the nineteenth century as inferred from the record of lake Victoria. *Climatic Change* 48: 387-398. doi:10.1023/A:1010736008362

Norrgard, S. (2015) Practising historical climatology in West Africa: a climatic periodisation 1750-1800. *Clim Change* 129: 131-143. doi: 10.1007/s10584-014-1307-9

Olago, D.O., Odada, E.O. (2004). Paleo-research in Africa: relevance to sustainable environmental management and significance for the future. In: *Past climate variability through Europe and Africa. Developments in Paleoenvironmental Research*, 6, 551-565.

Rodrigo, F.S., Millán, V. (2022). Early meteorological observations in West Africa during the 18th century. *Int. J. Climatol.*, 42, 9753-9766. doi; 10.1002/joc.7863

Schrier, G., Jones, P.D. (2008). Daily temperature and pressure series for Salem. Massachusetts (1786-1829). *Climatic Change* 87: 499-515. doi: 10.1007/s10584-007-9292-x

Verschuren, D. (2000). Rainfall and drought in equatorial east Africa during the past 1,100 years. *Nature*, 403, 410-414.

A PILOT URBAN HEAT SERVICE FOR CLIMATE RESILIENCE: CO-DESIGNING HIGH-RESOLUTION HEAT-STRESS SOLUTIONS FOR EUROPEAN CITIES

Nieves PEÑA[1], Daniel NAVARRO[1], Adrian GLODEANU[1], Efrén FELIU[1], Igone GARCÍA[1], Dirk LAUWAET[2], Dirk VANDEN BOER[2], Wout RENKIN[2], Nele VELDEMAN[2]

[1]TECNALIA, Basque Research and Technology Alliance (BRTA), Astondo Bidea, Edificio 700, 48160 Derio, Bizkaia, Spain.
[2]VITO, Environmental Intelligence Unit of the Flemish Institute for Technological Research (VITO), Mol, Belgium.

nieves.pena@tecnalia.com, nele.veldeman@vito.be

ABSTRACT

Extreme heat events are increasing in frequency and intensity across Europe (IPCC, 2022) creating an urgent need for high-resolution tools for urban adaptation. This paper introduces the Urban Heat Service (UHEATS), developed within the Destination Earth (DestinE) platform[1] to provide actionable insights into urban heat risks. The service was developed through a user-centred co-design process with major city networks and selected pilot cities, which allowed for the definition of its core functionalities and the selection of the most critical heat-stress indicators, enabling users to analyse historical and future climate projections (up to 2050) and evaluate the effectiveness of nature-based adaptation scenarios, such as urban reforestation and soil unsealing, ultimately helping city administrations and key stakeholders to better understand and address the impacts of heat stress in urban areas.

Keywords: urban heat stress, nature-based adaptation scenarios, impact indicators

INTRODUCTION

Extreme heat events are increasing in frequency and intensity across Europe, posing significant risks to human health, labour productivity, and urban liveability, particularly in densely built environments. Urban characteristics such as high building density, extensive impervious surfaces, and limited green infrastructure intensify urban overheating and exacerbate urban overheating, increasing both daytime and nighttime heat stress. Climate projections (Intergovernmental Panel On Climate Change (Ipcc), 2023, p. 20) indicate that population exposure to extreme heat is expected to increase towards the end of the century, with substantial regional variability. Inland regions such as the Iberian Peninsula and Italy are projected to experience more severe heatwaves, while coastal areas may face compounded risks from elevated temperatures and

[1] DestinE Platform - The platform provides evidence-based decision-making tools, applications and services, based on an open, flexible and secure cloud-based computing infrastructure. The platform is implemented by ESA.

humidity. Rapid urbanisation is expected to further amplify these impacts, increasing heat-related mortality and inequality. In this context, local governments and urban planners require reliable, high-resolution, and up-to-date information to design, prioritise, and evaluate effective adaptation strategies, including nature-based solutions. The Urban Heat Service (UHEATS) aims to respond to this need by operationalising a scalable service within the Destination Earth (DestinE) platform. Leveraging the Climate Digital Twin and Data Lake capabilities, the service provides actionable insights on past, present, and future urban heat impacts and supports evidence-based decision-making to enhance urban resilience across European cities.

METHODS

2.1 User-centre co-design approach

The co-design of the UHEATS service has followed a collaborative, user-centred approach to ensure it responds to concrete operational needs while maintaining scientific robustness. User requirements were gathered through an iterative stakeholder engagement process involving major city networks—Climate Alliance, Eurocities, ICLEI, and the Resilient Cities Network—as well as representatives from eight pilot cities members of these networks. The engagement process was structured into four sequential phases. Phase 1, awareness raising, focused on increasing understanding of urban heat stress through 2 workshops with city networks and a coordinated survey to identify interested cities and gather initial needs and priorities. Phase 2, co-design, involved two online webinars and in-depth interviews with city networks to prioritise key functionalities and refine interfaces, workflows, and outputs. Phase 3, testing and co-development, consisted of the iterative validation of service prototypes through follow-up meetings with pilot cities. Finally, Phase 4, evaluation and dissemination, focuses on capacity building to ensure long-term uptake, cross-sectoral impact, and sustained use of the UHEATS service beyond the project duration.

2.2 High-resolution simulations-based approach

UrbClim (De Ridder et al., 2015) is a high-resolution urban climate model that simulates urban heat, integrating detailed information on urban surface characteristics and morphology. In this study, UrbClim is driven by ERA5 climate input data for historical conditions (2000–2024) and Climate Digital Twin data for future projections up to 2050, based on the nextGEMS model (SSP3-7.0), applying bias-corrected statistical downscaling to generate consistent future time series. Land-cover–based maps and seasonal vegetation data are also used as terrain inputs, kept constant over time to isolate climate change impacts and ensure consistent multi-annual indicator analysis. Table 1 gives an overview of these terrain data sources.

Terrain input data	***Resolution***
CORINE land cover (2018)	*100m*
Copernicus DEM	*30m*
Sentinel 2 NDVI (2016-2024)	*10m*
CLMS Imperviousness density (2018)	*10m*
Anthropogenic heat flux (W/m²) (2015-2050)	*1 km*
Open Street Map building fraction (2025)	*100m*

Table 1: Overview of terrain input data needed by the UrbClim model.

The HiREx model is an add-on module to UrbClim that simulates outdoor heat stress, to derive hourly WBGT at a spatial resolution of 1 m for a representative summer day. (Lauwaet et al., 2020) (Souverijns et al., 2022). HiREx uses as input data Europe-covering data sets (Table 2) and 100 m resolution UrbClim outputs, including air temperature, humidity, and wind speed, together with surface pressure and shortwave and longwave radiation from the ERA5 reanalysis as meteorological forcing.

Terrain input data	***Resolution***
Urban Atlas land cover (2021)	*Detailed vectors*
Urban Atlas Street trees (2021)	*Detailed vectors*
Global Building Atlas (2025)	*1m*

Table 2: Overview of input data for the HiRex model.

RESULTS

Insights from the stakeholder engagement process were synthesised to define the core functionalities of the Urban Heat Service (UHEATS), developed within the DestinE platform. The key functionalities include: (1) selection of an area of interest via an interactive map, (2) configuration of temporal settings, (3) definition and comparison of urban adaptation scenarios, and (4) specification of a highresolution analysis domain together with a representative summer day. (5) interactive visual exploration of heatstress indicators and (6) download datasets and maps for further analysis and reporting. The UHEATS heat stress indicators were designed to strike a balance between scientific robustness, user relevance, and computational feasibility.

These indicators account for the combined effects of temperature, humidity, wind, and radiation, providing a more realistic representation of experienced heat stress than temperaturebased metrics alone. Table 3 provides a description of the indicators and their relevance for decision-making.

Indicator	Definition	Urban decisionmaking relevance
Urban Heat Island (UHI) intensity	It is the difference between the air temperature of each urban grid cell and the mean air temperature of all rural cells, computed from the time-averaged for the summer season (JJA). (Dosio, 2016) (Lauwaet et al., 2024)	Reflects the cumulative effect of urban form and land cover. Identifies structurally overheated areas.
Annual number of health heatwave days	It counts the health heatwave days, defined as a period of at least two consecutive days during which the maximum apparent temperature exceeds the 90th percentile and the minimum temperature exceeds the 90th percentile. (Romanello et al., 2022)	Supports heathealth action plans and the protection of vulnerable populations.
Number of extreme hot days	Annual count of days on which the daily maximum air temperature is greater than or equal to 35 °C, (Intergovernmental Panel On Climate Change (Ipcc), 2023)	It is widely used extremeheat metric that enables clear communication to policymakers.
Number of hours of thermal discomfort	Annual number of hours during which the Universal Thermal Climate Index (UTCI) is greater than or equal to 32 °C, capturing both intensity and persistence of thermal stress at hourly scale. (Havenith, 2001)	Identifies urban hot spots and informs finescale design of outdoor spaces and mitigation measures.
Heatrelated mortality	Estimates heat-attributable mortality by applying age-specific exposure–response functions to high-resolution urban temperature data. (Masselot et al., 2023)	Provides a direct healthimpact metric for prioritising adaptation measures.

Adaptation scenarios

An additional feature of the UHEATS service is the assessment of targeted climate adaptation strategies, with particular emphasis on naturebased solutions. Following stakeholder consultation, six adaptation measures were prioritised: urban trees, urban low vegetation, soil unsealing, green roofs, rural trees, and rural low vegetation. Users can define implementation percentages for each measure and combine them into multiple scenarios through the data request interface, supporting tailored analysis of adaptation impacts.

DISCUSSION

Key insights from the co-design process highlight the importance of iterative stakeholder engagement to ensure usability, relevance and capacity building of local actors and the long-term adoption of the service. Feedback gathered revealed a strong demand for high-resolution, locally actionable information, and easy-to use visuals that support decision-making. The tension between scientific complexity and user accessibility highlighted during the process suggests that the value of a Digital Twins lies not only in its computational power but in its ability to translate complex data into intuitive visuals for non-technical decision-makers. Furthermore, continuous interaction with city representatives enabled the refinement of indicators and functionalities to better align with policy and planning needs. Overall, the co-creation approach proved essential for enhancing both the operational value and the uptake potential of the UHEATS service. The engagement process also revealed two key challenges in urban heat adaptation. First, the demand for methodological support in problem framing and scenario definition to facilitate the mainstreaming of technical tools. Second, stakeholders emphasised the need for complementary contextual data, particularly the integration of socio-economic, demographic, and/or local-context information with heat-stress indicators to enable more robust vulnerability and risk assessments.

CONCLUSIONS

This paper presents the conceptual foundations of the UHEATS service, with a particular focus on the usercentred codesign process and its impact indicators. The integration of this service into the Destination Earth platform ensures a scalable pathway for its widespread adoption across European cities. The next phase will focus on a comparative assessment across the pilot cities—including Cascais, Worms, Thessaloniki, Bristol, Milan, Yenişehir, Larnaca, and Málaga— enabling a more detailed discussion of spatial variability, indicator performance, and the effectiveness of adaptation scenarios under different climatic and urban conditions.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was carried out within the framework of the European Union's Destination Earth initiative (contract DE_374f). Destination Earth is implemented by ECMWF under the leadership of the European Commission's Directorate-General for Communications Networks, Content and Technology (DG CNECT), in partnership with the European Space Agency (ESA) and the European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites (EUMETSAT). The authors gratefully acknowledge the constructive feedback provided by city networks — Climate Alliance, ICLEI, Eurocities, Resilient Cities Network — and stakeholders from pilot cities — Cascais, Worms, Thessaloniki, Bristol, Milan, Yenişehir, Larnaca, Málaga — which contributed significantly to improving the usability and relevance of the UHEAT service.

REFERENCES

De Ridder, K., Lauwaet, D., & Maiheu, B. (2015). UrbClim – A fast urban boundary layer climate model. Urban Climate, 12, 21-48. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2015.01.001

Dosio, A. (2016). Projections of climate change indices of temperature and precipitation from an ensemble of bias-adjusted high-resolution EURO-CORDEX regional climate models. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 121(10), 5488-5511. https://doi.org/10.1002/2015JD024411

Havenith, G. (2001). Individualized model of human thermoregulation for the simulation of heat stress response. Journal of Applied Physiology, 90(5), 1943-1954. https://doi.org/10.1152/jappl.2001.90.5.194

Intergovernmental Panel On Climate Change (Ipcc). (2023). Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (1.a ed.). Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009157896

IPCC. (2022). Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (H. O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, & B. Rama, Eds.). Cambridge University Press.

Lauwaet, D., Berckmans, J., Hooyberghs, H., Wouters, H., Driesen, G., Lefebre, F., & De Ridder, K. (2024). High resolution modelling of the urban heat island of 100 European cities. Urban Climate, 54, 101850. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2024.101850

Lauwaet, D., Maiheu, B., De Ridder, K., Boënne, W., Hooyberghs, H., Demuzere, M., & Verdonck, M.-L. (2020). A New Method to Assess Fine-Scale Outdoor Thermal Comfort for Urban Agglomerations. Climate, 8(1), 6. https://doi.org/10.3390/cli8010006

Masselot, P., Mistry, M., Vanoli, J., Schneider, R., Iungman, T., Garcia-Leon, D., Ciscar, J.-C., Feyen, L., Orru, H., Urban, A., Breitner, S., Huber, V., Schneider, A., Samoli, E., Stafoggia, M., de'Donato, F., Rao, S., Armstrong, B., Nieuwenhuijsen, M., … Aunan, K. (2023). Excess mortality attributed to heat and cold: A health impact assessment study in 854 cities in Europe. The Lancet Planetary Health, 7(4), e271-e281. https://doi.org/10.1016/S2542-5196(23)00023-2

Romanello, M., Di Napoli, C., Drummond, P., Green, C., Kennard, H., Lampard, P., Scamman, D., Arnell, N., Ayeb-Karlsson, S., Ford, L. B., Belesova, K., Bowen, K., Cai, W., Callaghan, M., Campbell-Lendrum, D., Chambers, J., Van Daalen, K. R., Dalin, C., Dasandi, N., … Costello, A. (2022). The 2022 report of the Lancet Countdown on health and climate change: Health at the mercy of fossil fuels. The Lancet, 400(10363), 1619-1654. https://doi.org/10.1016/S0140-6736(22)01540-9

Souverijns, N., De Ridder, K., Veldeman, N., Lefebre, F., Kusambiza-Kiingi, F., Memela, W., & Jones, N. K. W. (2022). Urban heat in Johannesburg and Ekurhuleni, South Africa: A meter-scale assessment and vulnerability analysis. Urban Climate, 46, 101331. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101331

CURVA DE DAÑO PARA LOS TEMPORALES MARÍTIMOS DE CANTABRIA

Ana COLLAZO-CASTIÑEIRA[1], Héctor LOBETO[1], Domingo RASILLA[2], Carolina GARMENDIA[2], Francisco Solano ESPEJO GIL[3], Urko ELOSEGI GURMENDI[3], Melisa MENENDEZ[1]

[1]IHCantabria - Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria
[2]Departamento de geografía, urbanismo y ordenación del territorio. Universidad de Cantabria
[3]Consorcio de Compensación de Seguros

collazoa@unican.es

RESUMEN

Los temporales marítimos, caracterizados por oleaje intenso y fuertes vientos, constituyen una amenaza cada vez mayor en zonas costeras. Este estudio analiza la relación entre las condiciones oceánicas de estos eventos y sus posibles impactos económicos en la costa de la región de Cantabria, durante un periodo histórico de 20 años. A partir de bases de datos (hindcast) que informan de las variaciones del nivel del mar y de los temporales de oleaje, se estiman niveles de agua total y grandes alturas de oleaje en costa, para relacionar estas estimaciones con información de indemnizaciones del Consorcio de Compensación de Seguros.

La identificación de eventos extremos se realiza mediante el método de Picos Sobre Umbral aplicado a niveles de agua total, asociando posteriormente los valores concomitantes de la altura de ola significante. La dependencia entre ambas variables se modela mediante la aproximación estadística de cópulas, a partir de la cual se estiman los contornos asociados a periodos de retorno. Finalmente se relacionan las condiciones extremas marinas con las magnitudes de las indemnizaciones económicas registradas. Los resultados muestran una relación de tipo exponencial entre el periodo de retorno de los eventos y los daños económicos causados.

Palabras clave: Extremos, Indemnización, Nivel de Agua Total, Oleaje, Peligro costero

ABSTRACT

Storms, characterized by intense waves and strong winds, represent a growing threat to coastal areas. This study analyzes the relationship between the oceanographic conditions of these events and their potential economic impacts along the coast of the Cantabria region over a 20-year historical period. Using hindcast databases of sea

level and wave conditions, total water level series and extreme nearshore wave heights are estimated and linked to insurance claims from the Consorcio de Compensación de Seguros.

Extreme events are identified using a Peaks Over Threshold method applied to total water level records, and the concurrent significant wave heights are then considered. The dependence between both variables is modeled using copulas, from which return period contours are estimated. The results show an exponential relationship between the joint return period of the events and the resulting economic losses.

Key words: Extremes, Insured losses, Total Water Level, Waves, Coastal Hazard

INTRODUCCIÓN

Las zonas costeras concentran aproximadamente el 23% de la población mundial y se prevé que esta cifra aumente más de un 50% entre 2000 y 2030 (Neumann et al., 2015). Este crecimiento acelerado genera importantes impactos ambientales. La urbanización en la costa reemplaza hábitats naturales, como dunas y marismas, incrementando la erosión y la vulnerabilidad ante fenómenos extremos. Entre los peligros costeros climáticos destacan los temporales marítimos que, combinados con intensos vientos y valores altos del nivel del mar, pueden provocar inundaciones severas, erosión y daños sobre bienes y estructuras considerables (Rivas et al., 2022). Por ejemplo, el impacto de los temporales marítimos durante el invierno de 2014 en la costa cantábrica española causó pérdidas superiores a 150 millones de euros. En este contexto, el presente trabajo analiza los eventos que causaron daños en la costa de Cantabria entre 1996 y 2015, estudiando la relación entre las variables oceánicas y las indemnizaciones llevadas a cabo por el CCS ante la categoría 'embate de mar'. La región de Cantabria cuenta con 284 km de litoral expuesto a oleajes que pueden superar los 6,5 m de altura de ola significante y unas variaciones en el nivel del mar ante mareas vivas que alcanza los 4 metros. Además, concentra más del 80% de su población en municipios costeros (Estadística, 2025), lo que la convierte en un área especialmente vulnerable ante la peligrosidad climática marina.

BASES DE DATOS

2.1. Datos del Consorcio de Compensación de Seguros (CCS)

El CCS es una entidad pública española encargada de indemnizar los daños causados por riesgos extraordinarios no cubiertos por las aseguradoras privadas, entre los que se incluyen las tormentas costeras. La base de datos proporcionada recoge las indemnizaciones concedidas a 16 municipios costeros de Cantabria por daños asociados a tormentas costeras entre 1996 y 2015, representadas en la Figura 1.

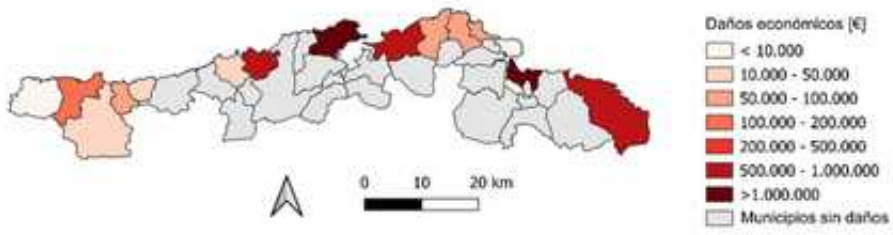


Figura 1: Distribución espacial de los daños económicos compensados por el CCS en cada municipio costero de Cantabria durante el periodo 1996-2015.

2.2. Datos de peligrosidad marina

Las variables oceánicas se extrajeron de diversas bases de datos generadas y validadas por IHCantabria. Para cada municipio, se definió un punto de referencia costero próximo al núcleo urbano, obteniéndose las series temporales de las dinámicas marinas en el nodo de simulación más cercano. El oleaje se obtuvo de la base de datos DOW (Downscaled Ocean Waves), con resolución espacial de 1 km. La marea astronómica se extrajo de la base de datos GOT (Global Ocean Tide) y la marea meteorológica de GOS (Global Ocean Surge). A partir de estas variables se calculó el nivel de agua total (NAT), que integra las contribuciones de la marea astronómica (MA), la marea meteorológica (MM) y la sobre-elevación del nivel del mar inducida por el oleaje (wave setup). Todas las bases de datos presentan resolución temporal horaria.

METODOLOGÍA

2.1. Caracterización de temporales marítimos

La identificación de eventos extremos se realizó mediante el método de Picos Sobre Umbral (POT) aplicado a la serie temporal de NAT, con un umbral del 95% y una independencia entre picos de 3 días. La asociación entre los eventos del CCS y los identificados mediante POT se estableció considerando una ventana de 24h. De los 26 eventos dañinos registrados, 17 fueron identificados con el método POT y utilizados en el análisis.

2.2. Análisis multivariado de eventos extremos

Para modelar la dependencia conjunta entre variables oceánicas ante condiciones extremas se empleó la teoría de cópulas. Las distribuciones marginales se ajustaron a funciones de distribución teóricas mediante el método de máxima verosimilitud, seleccionando el mejor modelo según el test de Kolmogorov-Smirnov y el criterio de información Aikake (AIC). A partir de las marginales ajustadas y transformadas a escala uniforme se evaluaron distintas familias de cópulas, seleccionando la más adecuada mediante el test de Cramér-von Mises. Finalmente, se calculó para cada

evento dañino el periodo de retorno 'AND', definido como el tiempo medio entre eventos en los que las variables superan simultáneamente sus umbrales.

RESULTADOS

Si bien el análisis se abordó para todos los municipios, los resultados se presentan para el municipio de Santander, al ser el que presenta la mayor densidad de población y el mayor número de eventos dañinos registrados, y pudiendo considerarse representativo de la costa de Cantabria.

Para el análisis multivariado se seleccionaron las variables NAT y Hs como principales indicadores de la severidad de los temporales marítimos en la costa cantábrica. Sus distribuciones marginales se ajustaron mediante una función de distribución de Pareto para NAT y una función de distribución generalizada de Extremos (GEV) para Hs, posteriormente transformadas a escala uniforme. La dependencia entre ambas variables se modeló mediante una cópula Survival Clayton, adecuada para capturar la dependencia en las colas superiores. A partir de este modelo se derivaron curvas de periodo de retorno conjunto (Figura 2). Adicionalmente, para cada evento dañino se calcularon las probabilidades empíricas basadas en la dependencia de rangos conjuntos entre variables, representados en la figura mediante el color de los círculos. El tamaño de estos indica el daño económico asociado a cada tormenta. En la Figura 2 se aprecia que los colores de los eventos dañinos registrados son consistentes con los de las regiones delimitadas por las curvas de periodo de retorno, modeladas mediante el análisis multivariante de extremos. A su vez, se observa que los círculos de mayor tamaño, y por tanto de mayor daño económico, se asocian a contornos de periodos de retorno más altos. Este resultado sugiere la existencia de una relación entre el periodo de retorno conjunto y el impacto económico de los eventos.

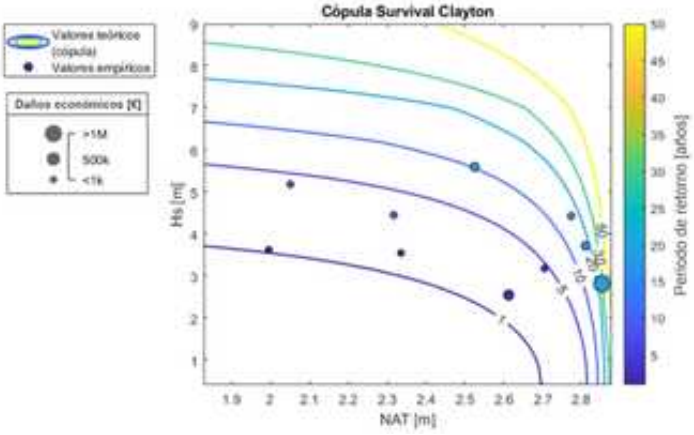


Figura 2: Curvas de periodo de retorno conjunto AND entre NAT y Hs. Los círculos representan eventos costeros registrados, coloreados según su probabilidad empírica y con tamaño proporcional al daño económico.

A partir de esta observación, en la Figura 3 se analiza la relación directa entre ambas variables. Se identifica una relación de tipo exponencial, que resulta en un buen ajuste (R^2 = 0.9). Este tipo de ajuste indica que, para periodos de retorno elevados (superiores a 20 años), pequeñas variaciones en la peligrosidad climática pueden traducirse en incrementos sustanciales de los daños económicos.

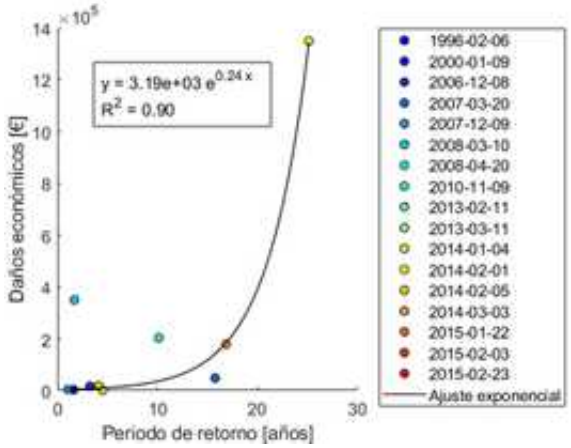


Figura 3: Relación entre el periodo de retorno conjunto y los daños económicos de los eventos dañinos registrados en Santander, con ajuste exponencial.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos muestran que el análisis conjunto de NAT y Hs mediante teoría de cópulas permite caracterizar la severidad de los temporales marítimos a partir de periodos de retorno y relacionarlos con los daños económicos. A partir del método de cópulas se ha modelado la dependencia entre ambas variables en la costa de Cantabria, extrayendo los periodos de retorno de los temporales registrados y estableciendo una relación de tipo exponencial con sus pérdidas. La curva de daño obtenida, de tipo exponencial, pone de manifiesto que para periodos de retorno elevados pequeñas variaciones pueden amplificar notablemente el impacto económico. La dispersión en algunos valores de la muestra utilizada indica que otros factores pueden condicionar la relación peligro-riesgo, como podrían ser ciertas características relativas a la exposición durante los eventos de temporal y NAT elevados.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio forma parte del proyecto CYCLOMAR (ref. PID2023-151200OB-I00) financiado/a por MCIN/AEI/ 10.13039/501100011033

REFERENCIAS

Estadística, I. C. (2025). *Boletín de Síntesis Demográfica, Cantabria 2025.*

Neumann, B., Vafeidis, A., Zimmermann, J., & Nicholls, R. (2015). Future Coastal Population Growth and Exposure to Sea-Level Rise and Coastal Flooding - A Global Assessment. *PLOS ONE*.

Rivas, V., Garmendia, C., & Rasilla, D. (2022). Analysis of Ocean Parameters as Sources of Coastal Storm Damage: Regional Empirical Thresholds in Northern Spain. *Climate*.

LA EXCEPCIONALIDAD DE LOS EPISODIOS DE CALOR EXTREMO DE LOS VERANOS DE 2022, 2023 Y 2025 EN ASTURIAS

Luis PÉREZ-GARCÍA[1], Cristina GARCÍA-HERNÁNDEZ[1], Jesús RUIZ-FERNÁNDEZ

[1]Universidad de Oviedo, Dpto. de Geografía

perezgluis@uniovi.es, garciahcristina@uniovi.es, ruizjesus@uniovi.es

RESUMEN

Este trabajo profundiza en la caracterización sinóptica de las olas de calor en Asturias a partir de 2022, en un contexto de incremento de eventos excepcionales. Se emplearon datos de reanálisis ERA5 para los 13 episodios registrados entre 2001 y 2025, seleccionados según criterios oficiales de AEMET. Mediante un análisis de conglomerados jerárquico sobre los campos compuestos de temperatura a 850 hPa, se identificaron tres patrones atmosféricos que subyacen a los extremos, cuyas anomalías se calcularon respecto al período climático 1991-2020. Los resultados evidencian un punto de inflexión a partir de 2022: seis de los trece episodios del siglo se concentran en este breve lapso, y todos ellos superan la anomalía media de +6,4 °C. Se han registrado récords absolutos de temperatura máxima en superficie independientemente de la configuración sinóptica dominante, lo que señala que el calentamiento de fondo prevalece sobre el patrón atmosférico concreto. Además, la ocurrencia de eventos extremos en junio y septiembre, con anomalías muy por encima de las climatologías mensuales, indica un alargamiento efectivo del verano. Los hallazgos confirman que umbrales térmicos antes considerados inviables ya se están superando, y reclaman una actualización urgente de las estrategias de adaptación.

Palabras clave: olas de calor, patrones atmosféricos, anomalías, cambio climático, Asturias.

ABSTRACT

This study examines the exceptional nature of recent heat waves in Asturias (NW Spain) using ERA5 reanalysis data. All 13 episodes identified (2001-2025) following official AEMET criteria were synthesized into composite fields of 850 hPa temperature and classified through hierarchical cluster analysis, yielding three synoptic patterns. Anomalies were computed against the 1991–2020 baseline. Results reveal a turning point after 2022: six of the 13 events occurred in this short period, all exceeding the

mean T850 anomaly of +6.4 °C. Absolute surface maximum temperature records were set irrespective of the specific synoptic configuration, demonstrating that background warming outweighs atmospheric pattern variability. Moreover, extreme episodes in June and September, with anomalies far exceeding monthly climatologies, point to an effective lengthening of the summer season. These findings confirm that temperature thresholds previously considered unattainable are already being surpassed, and underscore the urgent need to update adaptation strategies.

Key words: heat waves, atmospheric patterns, anomalies, climate change, Asturias.

INTRODUCCIÓN

Las olas de calor son fenómenos atmosféricos extremos con grandes impactos, especialmente sobre la salud humana, afectando también las actividades económicas y el medio ambiente (Conlon et al., 2020). Los efectos adversos combinados con el incremento reciente de su frecuencia e intensidad en un contexto de cambio climático, y las proyecciones de empeoramiento en el futuro, hacen necesarios este tipo de trabajos para profundizar en su estudio y reducir los riesgos para la población; especialmente en ámbitos poco habituados históricamente al calor extremo como Asturias, donde apenas hay trabajos sobre este tema. El objetivo principal de este trabajo es profundizar en la caracterización de las olas de calor producidas en Asturias desde el 2022 desde el punto de vista sinóptico. Los objetivos específicos son: comparar las situaciones atmosféricas que dieron lugar a los eventos extremos más representativos, analizar las anomalías de estos episodios con respecto a los valores climáticos normales (1991-2020) y contextualizar climáticamente estas excepcionalidades. La hipótesis es que se ha producido un incremento reciente de eventos excepcionales al margen del patrón atmosférico que los causa.

METODOLOGÍA

La selección de los episodios de ola de calor se ha basado en un trabajo previo (Pérez-García et al., 2025) siguiendo los criterios oficiales de AEMET (2024). El análisis se ha fundamentado en datos de reanálisis ERA5 (Hersbach et al. 2020), seleccionando las variables de temperatura a 850 hPa y altura geopotencial a 500 hPa sobre un dominio que abarca el sector atlántico-europeo (30°N-60°N, 20°W-20°E). El procedimiento se inició con la síntesis de los 13 episodios de ola de calor mediante el promedio de sus campos sinópticos, obteniendo mapas compuestos representativos de cada evento. Sobre estos se aplicó un análisis de conglomerados jerárquico utilizando la distancia euclídea y el método de Ward sobre los valores absolutos de T850. Esta clasificación permitió agrupar objetivamente los episodios en tres tipologías, calculándose posteriormente las anomalías térmicas regionales en comparación con el periodo climatológico de referencia (1991-2020).

Además, se eligieron los eventos representativos y excepcionales para cada uno de los tres clusters identificados. El criterio de selección se basó en la severidad térmica, priorizando aquellos episodios con las mayores anomalías positivas registradas y en la representatividad morfológica dentro de cada grupo. Todo el procesamiento de los datos y la elaboración de gráficos se ha realizado con el programa R 4.5.1.

RESULTADOS

Los resultados muestran un incremento de la frecuencia e intensidad de las olas de calor en Asturias a partir del 2022, ya que 6 de los 13 episodios ocurridos durante este siglo tuvieron lugar en ese último período. La mayor intensidad también se concentra en ese período, con todos los eventos por encima del umbral de anomalía media de 6,4ºC a partir del 2022. Algunos eventos suceden, incluso, fuera de los meses estivales de julio y agosto (figura 1). Se han obtenido tres patrones atmosféricos principales. El tipo 1 incluye dos episodios (2003 y 2025) y responde a una situación de advección sahariana amplia, que genera eventos más extremos como el caso excepcional de 2025. El tipo 2 (cuatro situaciones) combina una advección continental con la subsidencia por la dorsal ibérica, mientras que en el tipo 3 (siete eventos), es una situación de pantano barométrico con escaso gradiente y fuerte subsidencia. Se ha seleccionado como representativo del tipo 1 la ola de agosto de 2025, del tipo 2 la del 22 al 24 de agosto de 2023, y de tipo 3 la de julio de 2022 (figura 2).

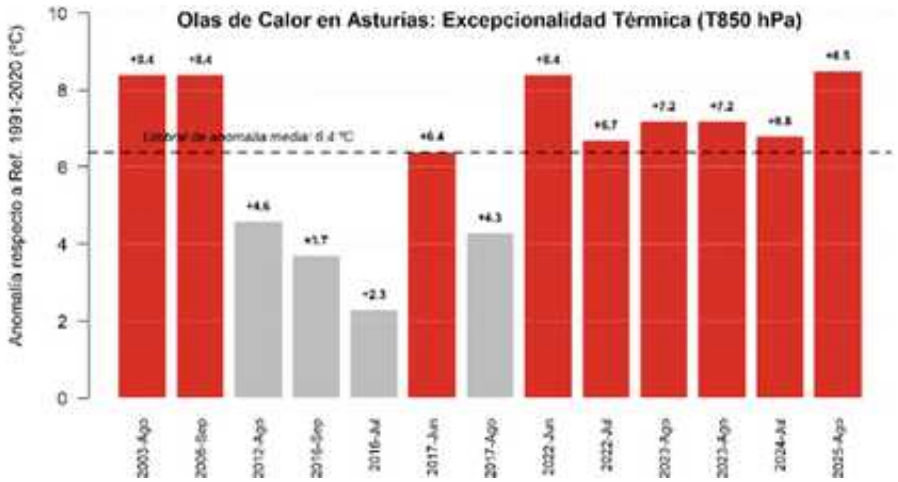


Figura 1. Anomalía de temperatura a 850 hPa de los episodios de ola de calor en Asturias (2001-2025) con respecto al período de referencia (1991-2020). Fuente: elaboración propia a partir del reanálisis ERA5.

DISCUSIÓN

La figura 1 evidencia que nos encontramos en un nuevo contexto climático en el área cantábrica, en el que los episodios de calor son más frecuentes e intensos y suceden eventos excepcionales por diferentes factores y por distintos tipos de configuración atmosférica como es el caso de los de 2022, 2023 y 2025. Esto es coherente con estudios recientes que sugieren que las temperaturas extremas alcanzadas en España en los últimos veranos no tienen precedentes en milenios y que algunos de los extremos proyectados para finales de siglo están sucediendo ya en los años recientes (Tejedor et al., 2024). Todos estos eventos extremos recientes han generado récords de temperaturas máximas superficiales en Asturias. Independientemente de la situación atmosférica responsable, los eventos excepcionales se han multiplicado a partir de 2022 en este nuevo contexto climático. No obstante, hay matices en esta afirmación, ya que las de tipo 1 son las que han generado mayores anomalías. La ola de agosto de 2025 batió numerosos récords de temperatura máxima en superficie en Asturias, alcanzándose los 41,2 ºC en Oviedo o los 43,1 ºC en Baíña (Mieres). Se produjo por la combinación de: 1) un gradiente de geopotencial muy acusado entre una dorsal sobre la península ibérica y una vaguada en el Atlántico que impulsa una advección potente y amplia de una masa de aire sahariana; 2) el calentamiento del aire por subsidencia ante la persistencia del anticiclón, y 3) vientos de componente sur que disparan la temperatura por efecto foehn.

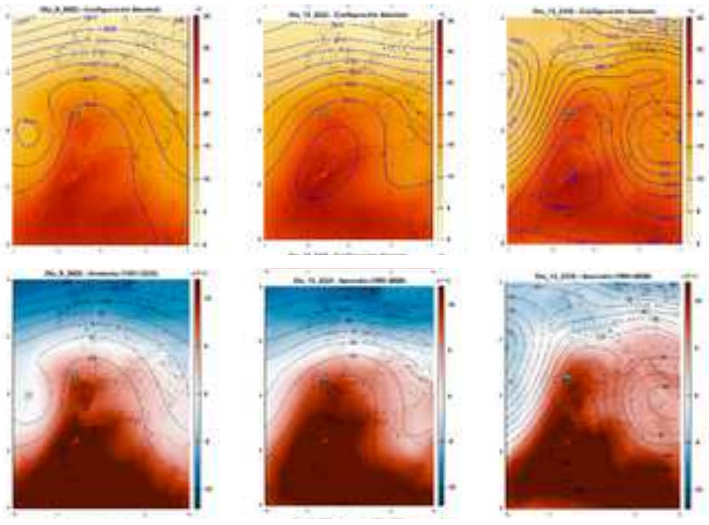


Figura 2. Mapas de situaciones atmosféricas representativas de cada tipo y las anomalías de cada ola con respecto al período de referencia (1991-2020). Fuente: elaboración propia a partir del reanálisis de ERA 5.

En la ola de agosto de 2023 (tipo 2) se produce una advección tropical continental unida a la estabilidad atmosférica con una dorsal de 150 metros de anomalía positiva, superándose de nuevo los 40ºC en superficie en valles interiores de Asturias. La ola de julio de 2022 (tipo 3) destaca por su duración de 10 días, siendo la propia persistencia de una dorsal muy anómala (150 metros) la que dispara las temperaturas en superficie por la subsidencia, registrándose 41,4 ºC en Baíña (Mieres) el 17 de julio de 2022. Por otra parte, cabe destacar que los episodios extremos no solo suceden en pleno verano, sino que se observan dos eventos en junio y otros dos en septiembre, que aunque muestren temperaturas a 850 hPa similares a otros, la anomalía se dispara al apartarse más de los valores climáticos normales para esos meses. Eso es coherente con un posible alargamiento del verano y extremos térmicos que alargan su período anual de posible ocurrencia en relación con el cambio climático (Rantanen & Laaksonen, 2024). En cuanto a los efectos de las olas de calor sobre la salud humana, los datos recientes de la aplicación “Mortalidad atribuible por calor en España” (MACE; Tobías et al., 2023), muestran picos de mortalidad en Asturias en los veranos de 2022 y 2025, coincidiendo con las olas mencionadas.

CONCLUSIONES

El análisis de las olas de calor en Asturias (2001-2025) revela un punto de inflexión a partir de 2022, con una concentración de seis de los trece episodios del siglo y una intensificación sin precedentes: todos los eventos posteriores a 2022 superan la anomalía media de +6,4 °C en T850. Esta excepcionalidad se ha materializado en récords absolutos de temperatura máxima en superficie (41,4 °C en julio de 2022, más de 40 °C en agosto de 2023 y 43,1 °C en agosto de 2025) y ha afectado a los tres patrones sinópticos identificados, evidenciando que el calentamiento de fondo domina sobre la configuración atmosférica concreta. Asimismo, la ocurrencia de eventos extremos en junio y septiembre, con anomalías muy superiores a las climatologías de esos meses, apunta a un alargamiento efectivo del período estival. Los resultados confirman que umbrales térmicos antes considerados inviables para la región ya están siendo alcanzados e incluso superados, en coherencia con proyecciones que anticipan un agravamiento. Por ello, urgen nuevos estudios sobre calor extremo, incorporando la nueva realidad climática a la planificación territorial.

REFERENCIAS

AEMET (2024). Olas de calor en España desde 1975. Área de climatología y Aplicaciones Operativas.

Conlon, K. C., Mallen, E., Gronlund, C. J., Berrocal, V. J., Larsen, L., & O’Neill, M. S. (2020). Mapping human vulnerability to extreme heat: A critical assessment of heat vulnerability indices created using principal components analysis. *Environmental health perspectives*, *128*(9), 097001.

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., ... & Thépaut, J. N. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly journal of the royal meteorological society*, *146*(730), 1999-2049.

Pérez-García, L., García-Hernández, C., & Ruiz-Fernández, J. (2025). Trends, Atmospheric Patterns, and Spatial Variability of Heatwaves in an Oceanic Climate Area of NW Iberia. *Land*, *14*(2), 310.

Rantanen, M., & Laaksonen, A. (2024). The jump in global temperatures in September 2023 is extremely unlikely due to internal climate variability alone. *npj Climate and Atmospheric Science*, *7*(1), 34.

Tejedor, E., Benito, G., Serrano, R., González, F., Esper, J., & Büntgen, U. (2024). Recent heatwaves as a prelude to climate extremes in the western Mediterranean region. *NPJ Climate and Atmospheric Science*, *7*(1), 218.

Tobías, A., Íñiguez, C., & Royé, D. (2023). From research to the development of an innovative application for monitoring heat-related mortality in Spain.

EVOLUCIÓN RECIENTE DE LOS FACTORES DINÁMICOS DE LA EROSIÓN HÍDRICA EN LA PROVINCIA DE ALMERÍA: EROSIVIDAD DE LA LLUVIA Y COBERTURA DEL SUELO

Antonio GALLEGOS REINA[1]

[1]*Universidad de Málaga*

a.gallegos@uma.es

RESUMEN

La provincia de Almería combina condiciones climáticas semiáridas y presiones socio-territoriales que la sitúan como una de las regiones de Europa con mayores procesos de erosión de suelos y desertificación. Para conocer cuál ha sido la evolución reciente de esta dinámica, se analizan en esta comunicación los dos factores variables claves de la erosión hídrica en la ecuación universal de pérdida de suelos (USLE): la erosividad de la lluvia (factor R) y la cobertura y manejo del suelo (factor C). El objetivo es caracterizar los cambios espaciales y temporales de ambos factores, y discutir sus implicaciones en la ordenación del territorio. Para el factor 'R' se calculan medias representativas en dos periodos: 1992–1999 y 2016–2023. Para el factor 'C' se comparan las fechas 1956 y 2022, a partir de información de usos del suelo, reclasificada y rasterizada para su traducción a valores de 'C'. Los resultados muestran un aumento moderado de la erosividad media de la lluvia entre los dos periodos analizados, junto con una intensificación mucho más marcada de los valores asociados al factor de cobertura y manejo del suelo. Estos cambios no permiten estimar por sí solos la pérdida total de suelo, pero sí identificar ámbitos donde ha aumentado la susceptibilidad territorial frente a procesos de erosión hídrica. La aportación principal del trabajo consiste en comparar de forma diacrónica los dos componentes más variables del modelo USLE/RUSLE, diferenciando los cambios atribuibles a la dinámica pluviométrica de aquellos vinculados a la transformación de los usos y coberturas del suelo.

Palabras clave: Erosión hídrica, erosividad de la lluvia, ordenación del territorio, Almería, desertificación.

ABSTRACT

The province of Almería (Spain) combines semi-arid climatic conditions and socio-territorial pressures that make it one of the European regions most affected by soil erosion and desertification processes. In order to understand the recent evolution of

this dynamic, this paper analyses the two key variable factors of water erosion in the Universal Soil Loss Equation (USLE): rainfall erosivity (R factor) and soil cover and management (C factor). The aim is to provide a characterisation of the spatial and temporal changes in both factors, and to discuss their implications for spatial planning. For the R factor, representative averages are calculated for two periods: 1992–1999 and 2016–2023. For the C factor, two dates are compared: 1956 and 2022, using land-use information that was reclassified and rasterised in order to assign corresponding C values. The results show a moderate increase in mean rainfall erosivity between the two periods analysed, together with a much more marked intensification of the values associated with the soil cover and management factor. These changes do not, in themselves, allow total soil loss to be estimated, but they do make it possible to identify areas where territorial susceptibility to water erosion processes has increased. The main contribution of this study lies in its diachronic comparison of the two most variable components of the USLE/RUSLE model, distinguishing changes attributable to rainfall dynamics from those linked to transformations in land use and land cover.

Key words: Water erosion, rainfall erosivity, spatial planning, Almería, desertification.

INTRODUCCIÓN

La erosión hídrica es uno de los procesos de degradación ambiental más relevantes en los ámbitos mediterráneos, tanto por su incidencia sobre la pérdida de suelo fértil como por sus conexiones con otros procesos territoriales, como la inundabilidad o los movimientos de laderas (García-Ruiz et al., 2013). En regiones de marcada irregularidad pluviométrica, donde las lluvias son relativamente escasas en términos medios, pero pueden presentarse con elevada intensidad, la respuesta del suelo ante los episodios torrenciales adquiere una importancia decisiva (Camarasa-Belmonte, 2021).

La provincia de Almería reúne de forma especialmente destacada estas características. Se trata de un territorio con fuertes contrastes internos, donde confluyen espacios de montaña, corredores prelitorales, amplias superficies semiáridas y zonas costeras profundamente transformadas por la intensificación agraria y urbana. Esta complejidad convierte a la provincia en un ámbito particularmente adecuado para estudiar la evolución reciente de la erosión hídrica.

Dentro de la ecuación USLE/RUSLE, el factor R expresa la agresividad o erosividad de la lluvia, es decir, la capacidad potencial de las precipitaciones para desestructurar y movilizar partículas del suelo. Se trata de un factor directamente vinculado a la intensidad del evento pluviométrico y a su distribución espacio-temporal, aspectos que están experimentando cambios significativos en el contexto actual de cambio climático. Por su parte, el factor C representa la cobertura y el manejo del suelo, y

el manejo del suelo, y sintetiza el grado de protección que aporta la vegetación, el tipo de uso agrario o la forma en que el territorio ha sido transformado por la acción humana. Ambos factores son dinámicos y, por tanto, particularmente útiles para el análisis diacrónico.

El estudio de estos dos factores permite analizar tanto los procesos ligados a la evolución climática como los procesos ligados a la transformación del territorio (Gallegos Reina & Perles Roselló, 2021). No obstante, el presente trabajo no pretende estimar la pérdida total de suelo mediante USLE/RUSLE, ya que para ello sería necesario integrar también los factores de erodabilidad del suelo, longitud y pendiente de ladera, y prácticas de conservación. Su finalidad es más acotada: caracterizar la evolución espacial del factor R entre los periodos 1992-1999 y 2016-2023, y del factor C entre 1956 y 2022, para el conjunto de la provincia de Almería. El análisis se orienta a cuantificar la magnitud media del cambio, localizar los principales patrones espaciales de aumento o disminución, y valorar sus implicaciones territoriales para la gestión preventiva de la erosión hídrica.

METODOLOGÍA

El análisis se basa en una comparación diacrónica de los factores R y C de la USLE/RUSLE. El factor R representa la erosividad de la lluvia, es decir, la capacidad potencial de las precipitaciones para generar desagregación y transporte de partículas del suelo. El factor C expresa el efecto protector de la cubierta vegetal y de los usos del suelo frente a la erosión. En este trabajo ambos factores se consideran indicadores parciales de susceptibilidad erosiva, no una estimación completa de pérdida de suelo.

Para el factor R se han utilizado los datos anuales de erosividad de la lluvia disponibles en REDIAM. Se han calculado dos valores medios plurianuales, correspondientes a 1992-1999 y 2016-2023, con objeto de reducir el efecto de la variabilidad interanual propia de las precipitaciones mediterráneas. Posteriormente se ha obtenido una capa de cambio mediante la diferencia entre ambos periodos, identificando áreas con aumento, estabilidad o descenso relativo de la erosividad. Para el factor C se han utilizado las cartografías de usos y coberturas del suelo de 1956 y 2022. Ambas fuentes fueron armonizadas mediante una leyenda común de grandes clases de ocupación, reclasificadas según su capacidad relativa de protección del suelo y rasterizadas para permitir la comparación espacial. Los valores asignados al factor C se interpretan en sentido relativo: valores bajos indican mayor protección frente al impacto de la lluvia y la escorrentía superficial, mientras que valores altos indican menor protección. Para facilitar la lectura cartográfica y estadística, los resultados se expresan como C×100.

La metodología seguida combina una doble aproximación. Por un lado, se utilizan estadísticas descriptivas básicas (medias provinciales), con el fin de sintetizar la dirección e intensidad general del cambio. Por otro, se realiza una lectura cartográfica comparada, atendiendo en este caso a la distribución espacial detallada en todo el territorio provincial. Este segundo nivel de interpretación resulta especialmente relevante, ya que los factores variables de la erosión hídrica suelen mostrar distribuciones muy heterogéneas y no siempre quedan adecuadamente representados por un valor medio único.

El procedimiento permite comparar la evolución espacial de ambos factores, pero presenta dos limitaciones que deben tenerse en cuenta: en primer lugar, no permite atribuir causalidad directa entre cambios pluviométricos, cambios de uso y erosión efectiva; en segundo lugar, no sustituye a una modelización completa de la pérdida de suelo, que requeriría incorporar el resto de factores de USLE/RUSLE. Su utilidad reside en identificar áreas donde coinciden incrementos de erosividad y reducción de la protección superficial.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En atención al factor R, los resultados muestran un incremento moderado, pasando de 3.577,4 a 3.846,4 MJ*mm/ha*h*año, lo que confirma un aumento reciente de la erosividad media de la lluvia. Se observa también una redistribución espacial de la intensidad de las precipitaciones. En el periodo 1992-1999 los valores elevados del factor R aparecían repartidos en varios sectores interiores y occidentales, mientras que en 2016-2023 se observa una mayor concentración de máximos en el este y sureste provincial. El mapa de evolución (Figura 1) confirma que los principales aumentos se localizan en el Campo de Níjar, Sierra Alhamilla y varios sectores del litoral suroriental. La distribución espacial del incremento es coherente con la incidencia de episodios de precipitación intensa característicos del ámbito mediterráneo, aunque la confirmación de esta relación requeriría un análisis específico de eventos extremos.

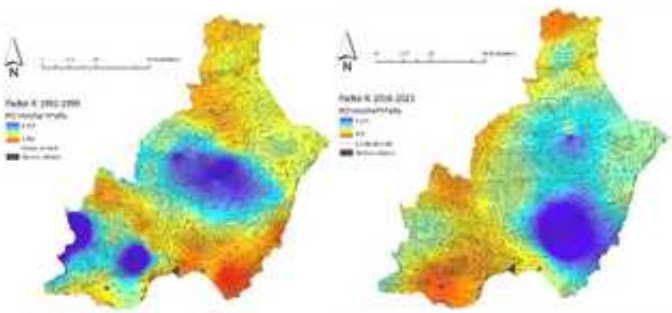


Figura 1. Distribución espacial del factor R en la provincia de Almería en los periodos 1992-1999 y 2016-2023. Elaboración propia.

En relación al factor C (adimensional), presenta una evolución mucho más intensa. La media provincial pasa de 13,87 en 1956 a 29,99 en 2022, lo que indica una pérdida muy significativa de capacidad protectora del suelo. En 1956 predominaban mosaicos agrarios tradicionales y coberturas naturales o seminaturales con valores relativamente bajos y medios. En 2022 aumenta de forma clara la presencia de valores altos de C, con una mayor fragmentación territorial y un deterioro más acusado de la protección edáfica. Los cambios más significativos del factor C (Figura 2) se concentran en el litoral occidental, especialmente en el Campo de Dalías y el Poniente almeriense, donde se reconoce una franja continua de aumento muy intenso. Este aumento coincide espacialmente con áreas de fuerte intensificación agraria, expansión de invernaderos, movimientos de tierras, infraestructuras auxiliares y artificialización del suelo. Aunque la cartografía empleada no permite aislar el peso individual de cada proceso, la concentración espacial del cambio evidencia una transformación profunda de las condiciones superficiales que regulan la escorrentía y la protección edáfica.

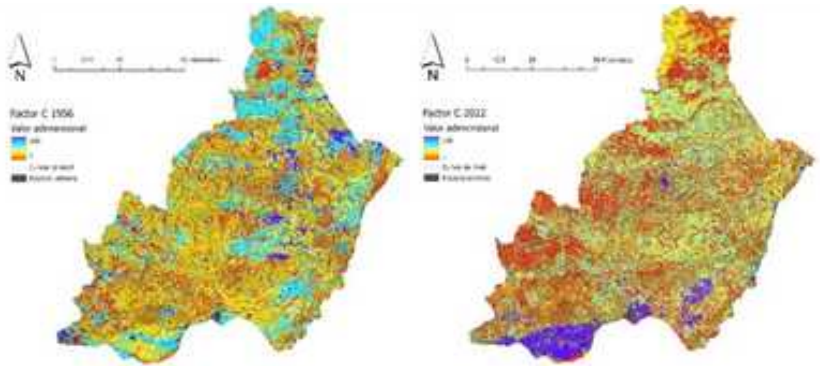


Figura 2. Distribución espacial del factor C en la provincia de Almería en 1956 y 2022. Elaboración propia.

También destacan los incrementos del factor C en el entorno metropolitano de Almería y en el Campo de Níjar, donde confluyen expansión urbana, intensificación agraria e implantación de nuevas infraestructuras. En el Levante almeriense aparecen igualmente varios focos de aumento, aunque de forma más discontinua, vinculables a transformaciones urbanas y agrarias en ámbitos costeros y prelitorales.

Frente a ello, algunos sectores interiores y septentrionales muestran estabilidad o incluso descensos locales del factor C. En términos generales, estos comportamientos pueden interpretarse como resultado de una menor presión transformadora reciente y, en ciertos casos, del abandono de cultivos marginales y de la recuperación de cubiertas seminaturales.

La comparación entre ambos factores muestra que la evolución reciente de la susceptibilidad erosiva en Almería no puede explicarse únicamente por la dinámica pluviométrica. El incremento medio del factor R es relevante, pero moderado, mientras que el aumento del factor C es mucho más acusado. Esto sugiere que, en el periodo analizado, las transformaciones de la cubierta y los usos del suelo han tenido un papel especialmente importante en la pérdida de protección superficial. En consecuencia, las medidas de gestión no deberían centrarse solo en la peligrosidad climática, sino también en la ordenación de los usos del suelo, la conservación de cubiertas vegetales, el control de superficies removidas y la gestión de la escorrentía en espacios agrarios intensivos y áreas artificializadas.

Debe señalarse, no obstante, que los resultados tienen un carácter diagnóstico. La identificación de áreas con aumento de R o C no equivale necesariamente a un incremento proporcional de la erosión efectiva, ya que esta depende también de la erodabilidad del suelo, la pendiente, la longitud de ladera y las prácticas de conservación. Por ello, los mapas obtenidos deben interpretarse como una aproximación a la evolución de la susceptibilidad territorial, útil para orientar análisis posteriores de mayor detalle y para priorizar ámbitos de gestión preventiva.

CONCLUSIONES

El análisis realizado permite extraer tres conclusiones principales. En primer lugar, el factor R muestra un incremento medio moderado entre 1992-1999 y 2016-2023, del orden del 7,5 %, con una redistribución espacial hacia sectores del este y sureste provincial. Este resultado apunta a un aumento localizado de la erosividad pluviométrica, aunque su interpretación requiere considerar la elevada variabilidad interanual de las precipitaciones mediterráneas.

En segundo lugar, el cambio más intenso corresponde al factor C, que pasa de 13,87 en 1956 a 29,99 en 2022. Este incremento refleja una reducción notable de la capacidad protectora de las coberturas del suelo, especialmente en el Campo de Dalías-Poniente, el entorno metropolitano de Almería, el Campo de Níjar y algunos enclaves del Levante almeriense.

En tercer lugar, la coincidencia espacial entre aumento de la erosividad y reducción de la protección superficial permite identificar ámbitos prioritarios para la gestión preventiva de la erosión hídrica. Entre las medidas más relevantes se encuentran la conservación de cubiertas vegetales, la reducción de superficies desnudas o removidas, la integración del drenaje superficial en áreas agrarias intensivas y la consideración de la fragilidad edáfica en la planificación territorial.

REFERENCIAS

García-Ruiz, J. M., Nadal-Romero, E., Lana-Renault, N., & Beguería, S. (2013). Erosion in Mediterranean landscapes: Changes and future challenges. *Geomorphology*, 198, 20–36. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.05.023

Camarasa-Belmonte, A. M. (2021). Flash-flooding of ephemeral streams in the context of climate change. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 47(1), 121–142. https://doi.org/10.18172/cig.4838

Gallegos Reina, A., & Perles Roselló, M. J. (2021). Relationships between peri-urbanization processes and multi-hazard increases: Compared diachronic analysis in basins of the Mediterranean Coast. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(11), Article 759. https://doi.org/10.3390/ijgi10110759

PROPAGACIÓN DE LA SEQUÍA CLIMÁTICA A LA SEQUÍA EN EL AGUA SUBTERRÁNEA EN ACUÍFEROS NATURALES ANDALUCES

Paula SERRANO-ACEBEDO y Natalia LIMONES

Departamento de Geografía Física y Análisis Geográfico Regional. Universidad de Sevilla.

pserrano1@us.es, natalialr@us.es

RESUMEN

La sequía climática no se transmite al agua subterránea de forma inmediata ni lineal, sino a través de respuestas retardadas y amortiguadas controladas por la litología, la capacidad de almacenamiento y la estacionalidad de la recarga. Este trabajo analiza esa propagación en cuatro acuíferos andaluces de comportamiento casi natural (Sierra Norte, Grajales-Pandero, Sierra de las Nieves y Parpacén) a partir de nueve piezómetros. Las series piezométricas, discontinuas y con huecos, se regularizaron mensualmente mediante modelos transfer-function noise implementados en el software Pastas, y a partir de ellas se calculó el Standardised Groundwater Index (SGI). La sequía climática se caracterizó mediante el SPEI en escalas de 1 a 48 meses. La relación SGI-SPEI se evaluó mediante correlaciones multiescalares y análisis estacional, con el fin de identificar las escalas temporales dominantes y la estructura intraanual de la propagación.

Los resultados muestran un gradiente litológico nítido de memoria hidrológica: las mejores correspondencias con el SGI se obtienen con SPEI de aproximadamente 12 meses en acuíferos fracturados, 15-20 meses en sistemas kársticos y más de 20-25 meses en sistemas porosos. Además, el análisis estacional revela que el SPEI de final de invierno y primavera controla en gran medida el SGI de final de verano y otoño, cuando el almacenamiento subterráneo alcanza sus mínimos anuales. En términos aplicados, los resultados permiten definir ventanas SPEI específicas por tipología hidrogeológica y sugieren una posible ventana estacional de seguimiento y alerta temprana. Como análisis complementario, la coherencia wavelet entre las series SPEI-SGI apunta a que el acoplamiento clima-acuífero no es completamente estacionario y tiende a intensificarse durante los periodos de sequía subterránea.

Palabras clave: sequía subterránea, propagación de la sequía, SPEI, SGI, Andalucía, acuíferos.

ABSTRACT

Climatic drought does not propagate to groundwater in an immediate or linear way, but through delayed and buffered responses controlled by lithology, storage capacity and recharge seasonality. This study analyses that propagation in four near-natural aquifers in Andalusia (southern Spain) using nine piezometers distributed across Sierra Norte, Grajales-Pandero, Sierra de las Nieves and Parpacén. Discontinuous groundwater-level records were regularised at monthly scale with transfer-function noise models implemented in Pastas, from which Standardised Groundwater Index (SGI) series were derived. Climatic drought was characterised using the Standardised Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) at accumulation windows from 1 to 48 months. The SGI-SPEI relationship was assessed through multiscale correlations and seasonal analysis in order to identify dominant timescales and the intra-annual structure of drought propagation.

Results reveal a clear lithological gradient of hydrological memory: the strongest correspondence with SGI is obtained for SPEI accumulation periods of about 12 months in fractured aquifers, 15-20 months in karst systems, and more than 20-25 months in porous systems. In addition, seasonal analysis shows that late-winter and spring SPEI strongly control late-summer and autumn SGI, when groundwater storage usually reaches its annual minimum. From an applied perspective, the findings support the definition of lithology-specific SPEI windows for groundwater monitoring and suggest a potential seasonal early-warning window. As a complementary line of analysis, wavelet coherence suggests that climate-aquifer coupling is not fully stationary and tends to strengthen during groundwater drought periods.

Key words: groundwater drought, drought propagation, SPEI, SGI, Andalusia, aquifers.

INTRODUCCIÓN

La región mediterránea constituye uno de los principales puntos críticos de riesgo relacionado con el cambio climático y el agua, donde el aumento de la demanda evaporativa y la mayor recurrencia de sequías cálidas intensifican la propagación de déficits hídricos a lo largo del ciclo hidrológico (Vicente-Serrano et al., 2010). Sin embargo, la sequía en las aguas subterráneas sigue estando menos caracterizada que la sequía meteorológica o la sequía en el agua superficial, pese a que su persistencia condiciona caudales base, ecosistemas dependientes y disponibilidad de recursos. En este contexto, el SGI permite describir anomalías piezométricas estandarizadas y comparables entre pozos, mientras que el SPEI incorpora tanto precipitación como demanda atmosférica y resulta especialmente adecuado para ambientes mediterráneos (Bloomfield y Marchant, 2013; Beguería et al., 2014).

En Andalucía existen fuentes hidrogeológicas de referencia, como el Atlas hidrogeológico de Andalucía, la cartografía hidrogeológica regional y la planificación hidrológica, que describen la estructura y funcionamiento de las principales masas de agua subterránea (ITGE y Junta de Andalucía, 1998; Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, 2023). También hay estudios sobre sistemas concretos o comparables, como Sierra Norte, Sierra de las Nieves o Parpacén (López-Geta et al., 2011; Pardo-Igúzquiza et al., 2016; Rubio-Campos et al., 2011). Sin embargo, son menos frecuentes los trabajos comparativos sobre propagación de sequía climática a sequía subterránea en acuíferos andaluces casi naturales. Estos sistemas permiten aislar mejor la señal climática y evaluar cómo la litología condiciona los retrasos, la amortiguación y la persistencia de las anomalías piezométricas. Desde esta perspectiva, el estudio aporta una comparación orientada tanto a la interpretación hidrogeológica como a ofrecer apoyo al seguimiento y la alerta temprana.

OBJETIVOS

El objetivo principal de esta investigación es caracterizar cómo se propaga la sequía climática hacia la sequía en las aguas subterráneas en acuíferos andaluces de comportamiento casi natural. De forma específica, se pretende:

- Completar y homogeneizar series piezométricas discontinuas mediante modelos de función de transferencia y ruido implementados en Pastas, con el fin de obtener series continuas y comparables de SGI.
- Identificar las escalas temporales del SPEI que mejor explican la variabilidad del SGI.
- Analizar la estructura estacional de la relación clima-acuífero y su posible utilidad para seguimiento y alerta temprana.
- Explorar la estabilidad temporal de la relación SGI-SPEI en periodos de sequía y no sequía.

METODOLOGÍA

Se analizaron nueve piezómetros distribuidos en cuatro acuíferos andaluces casi naturales: Sierra Norte, de carácter fracturado; Sierra de las Nieves y Parpacén, de comportamiento kárstico; y Grajales-Pandero, de carácter poroso. Las series piezométricas, de distinta longitud y con discontinuidades, se reconstruyeron a escala mensual mediante modelos transfer-function noise implementados en Pastas, que permiten representar el nivel piezométrico como una respuesta retardada y amortiguada ante forzantes externos y regularizar series discontinuas sin recurrir a interpolaciones puramente estadísticas (Collenteur et al., 2019, 2021). Se emplearon precipitación y evapotranspiración potencial como forzantes principales, incorporando caudales y humedad del suelo cuando mejoraban el ajuste.

Con las series regularizadas se calculó el Standardised Groundwater Index (SGI), para comparar anomalías piezométricas entre pozos y reducir el peso de la estacionalidad (Bloomfield y Marchant, 2013).

La sequía climática se caracterizó mediante el SPEI en escalas de acumulación de 1 a 48 meses (Vicente-Serrano et al., 2010; Beguería et al., 2014). Posteriormente, se calcularon correlaciones totales y mensuales entre SGI y SPEI para identificar las escalas de acumulación que mejor explican la variabilidad piezométrica y, por tanto, la memoria hidrogeológica dominante de cada sistema.

De forma complementaria, se aplicó coherencia wavelet para evaluar si la relación SGI-SPEI se mantenía estable o cambiaba en el tiempo y según la escala temporal. A diferencia de una correlación global, la WTC permite identificar cuándo y a qué periodicidades ambas series evolucionan de forma sincronizada, lo que resulta útil cuando el acoplamiento clima-acuífero es no estacionario (Torrence y Compo, 1998; Grinsted et al., 2004). El análisis distinguió periodos con sequía subterránea moderada o severa, definidos por SGI < -1, y periodos sin sequía.

RESULTADOS

Los resultados muestran como todos los piezómetros reproducen los grandes episodios regionales de sequía, especialmente los eventos de 2005-2008, 2017-2019 y 2020-2023, aunque con distintos tiempos de respuesta, intensidades y persistencias. El episodio 2020-2023 destaca por generar mínimos de SGI sin precedentes en varios sondeos, con respuestas más persistentes en los sistemas de mayor almacenamiento.

La relación SGI-SPEI (Figura 1) evidencia un gradiente litológico claro. En Sierra Norte, de naturaleza fracturada, las mejores correspondencias se alcanzan con SPEI en torno a 12 meses, lo que indica respuestas relativamente rápidas y menor amortiguación. En Sierra de las Nieves y Parpacén, de comportamiento kárstico, las máximas correlaciones se concentran en escalas intermedias, alrededor de 15-20 meses, compatibles con una respuesta rápida pero parcialmente amortiguada por el almacenamiento epikárstico. En Grajales-Pandero, las relaciones más intensas aparecen con SPEI de larga acumulación, superiores a 20 meses y cercanas a 25-29 meses, reflejando mayor almacenamiento, amortiguación y persistencia de las anomalías subterráneas.

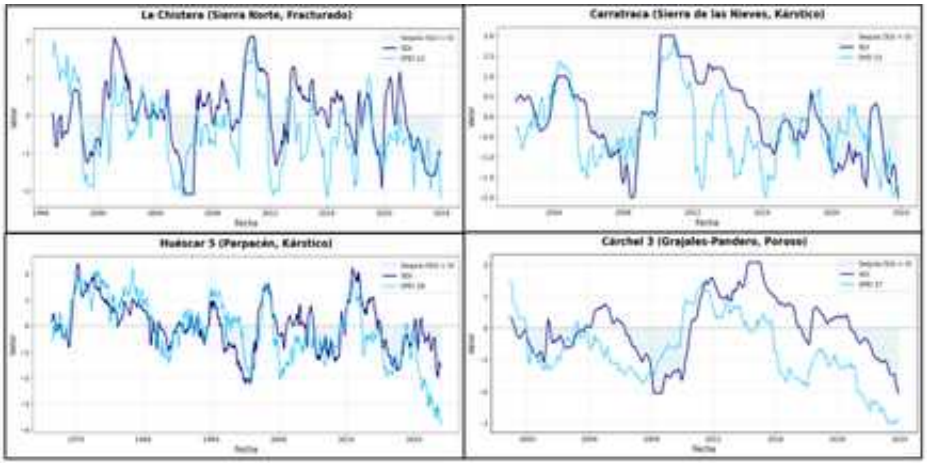


Figura 1. Series mensuales de SGI y SPEI dominante en piezómetros representativos de acuíferos fracturados, kársticos y porosos. Fuente: elaboración propia a partir de las series analizadas.

Acuífero	Tipología	Piezómetros	SPEI dominante	Interpretación
Sierra Norte	Fracturado	La Chistera,Llanos de San Juan	12 meses	Respuesta rápida, menor amortiguación y recuperación relativamente ágil.
Sierra de las Nieves	Kárstico	Yunquera,Carratraca	15–20 meses	Respuesta intermedia, con almacenamiento parcial.
Parpacén	Kárstico	Huéscar 5	~17 meses	Acoplamiento rápido pero no lineal; sensibilidad a condiciones antecedentes.
Grajales-Pandero	Poroso	Cárchel 1,Cárchel 3,La Merced,Quiebrajano	>20–25 meses	Larga memoria, fuerte amortiguación y persistencia prolongada.

Tabla 1. Tipología de acuíferos, piezómetros y escalas SPEI dominantes. Fuente: elaboración propia a partir de los resultados del estudio.

La estructura estacional de la relación SGI-SPEI permite identificar en qué momentos del año las condiciones climáticas acumuladas tienen mayor influencia sobre el estado posterior del acuífero. La figura 2 muestra la vinculación específica mensual entre el SPEI de final de invierno y primavera con el SGI de final de verano y otoño, coincidiendo con el periodo en el que el almacenamiento subterráneo suele alcanzar sus mínimos anuales. Este patrón aparece en los cuatro acuíferos, aunque con distinta nitidez, y sugiere una ventana estacional útil para el seguimiento y la posible anticipación de episodios de sequía subterránea.

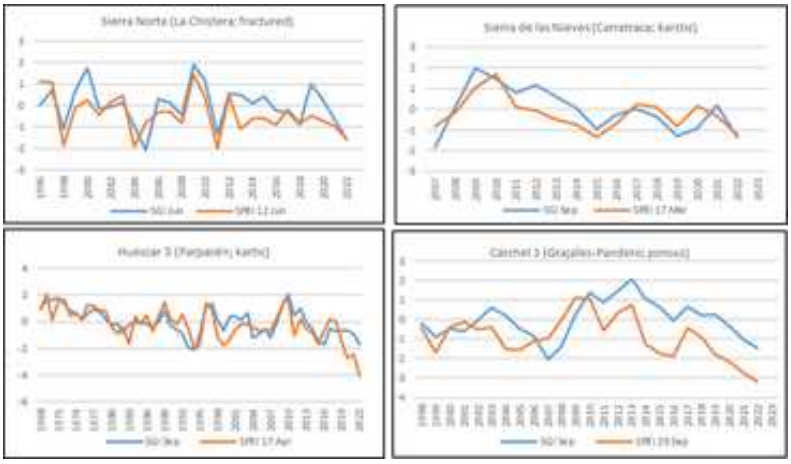


Figura 2. Relación estacional dominante entre SPEI y SGI. La figura identifica los meses y escalas SPEI más relacionados con el SGI posterior. Fuente: elaboración propia.

Adicionalmente, la coherencia wavelet añade una lectura que no ofrecen las correlaciones integradas, pues muestra que el acoplamiento SGI-SPEI no es continuo, sino que aparece en “islas” de coherencia localizadas en determinados periodos y escalas temporales (Figura 3). Este patrón confirma el carácter no estacionario de la relación clima-acuífero. En los acuíferos fracturados, la coherencia se concentra en escalas estacionales-anuales, mientras que en los sistemas porosos domina en bandas interanuales o multianuales. Además, la coherencia máxima aumenta durante los periodos de sequía subterránea moderada o severa, definidos por SGI < -1.

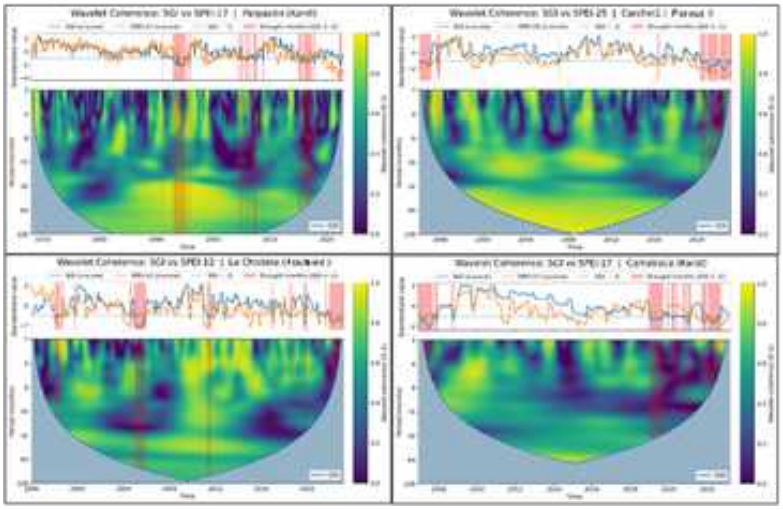


Figura 3. Coherencia wavelet entre el SPEI y el SGI para un piezómetro representativo de cada acuífero. Los colores cálidos indican mayor coherencia entre ambas series, mientras que los colores fríos indican una relación débil o inexistente; los periodos de sequía subterránea moderada o superior, definidos por SGI < -1, aparecen sombreados en rojo. Fuente: elaboración propia.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los resultados confirman que la sequía subterránea en acuíferos andaluces casi naturales no puede interpretarse como una prolongación directa de la sequía climática, sino como una respuesta filtrada por la estructura y capacidad de almacenamiento de cada sistema. Esta lectura es coherente con los marcos de propagación de la sequía, que describen una transmisión progresiva desde la anomalía meteorológica hacia la recarga y los niveles piezométricos, con retardos y atenuación crecientes (Van Loon, 2015; Parry et al., 2016). También coincide con estudios basados en SGI que muestran que las correlaciones clima-acuífero se maximizan en escalas intermedias o largas, moduladas por la litología, la conectividad hidráulica, el almacenamiento y la transmisividad (Bloomfield y Marchant, 2013; Babre et al., 2022).

Las ventanas SPEI dominantes pueden interpretarse como una aproximación a la memoria hidrogeológica efectiva: más corta en acuíferos fracturados, intermedia en sistemas kársticos y más prolongada en acuíferos porosos. Por ello, los indicadores de seguimiento deberían adaptarse a la tipología hidrogeológica, combinando la ventana SPEI dominante como señal climática antecedente, el SGI como indicador del estado subterráneo y el umbral SGI < -1 como referencia de sequía subterránea moderada o severa. Además, el vínculo entre el SPEI de final de invierno-primavera y el SGI de final de verano-otoño sugiere una ventana estacional de vigilancia. No obstante, la coherencia wavelet muestra que el acoplamiento SGI-SPEI no es constante, sino que se intensifica o debilita según la escala temporal y el estado hidrológico antecedente. En conjunto, la metodología aplicada permite diagnosticar la propagación de la sequía y orientar el seguimiento de acuíferos poco alterados por la extracción. Como línea posterior, estos resultados servirán para probar modelos predictivos sencillos, basados en ventanas SPEI, que estimen el SGI y evalúen hasta qué punto la sequía subterránea puede anticiparse a partir de información climática.

REFERENCIAS

Babre, A., Kalvāns, A., Avotniece, Z., Retiķe, I., Bikše, J., Popovs, K., Jemeljanova, M., Zelenkevics, A., & Dēliņa, A. (2022). The use of predefined drought indices for the assessment of groundwater drought episodes in the Baltic States over the period 1989–2018. *Journal of Hydrology: Regional Studies, 40*, 101049. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101049

Beguería, S., Vicente-Serrano, S. M., Reig, F., & Latorre, B. (2014). Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: Parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring. International *Journal of Climatology*, 34(10), 3001–3023. https://doi.org/10.1002/joc.3887

Bloomfield, J. P., & Marchant, B. P. (2013). Analysis of groundwater drought building on the standardised precipitation index approach. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17, 4769–4787. https://doi.org/10.5194/hess-17-4769-2013

Confederación Hidrográfica del Guadalquivir. (2023). *Plan Hidrológico de la demarcación hidrográfica del Guadalquivir. Revisión de tercer ciclo (2022-2027). Memoria.* Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico.

Collenteur, R. A., Bakker, M., Caljé, R., Klop, S. A., & Schaars, F. (2019). Pastas: Open-source software for the analysis of groundwater time series. *Groundwater*, 57(6), 877–885. https://doi.org/10.1111/gwat.12925

Collenteur, R. A., Bakker, M., Klammler, G., Fleckenstein, J. H., & Broers, H. P. (2021). Estimation of groundwater recharge from groundwater levels using nonlinear transfer function noise models and comparison to lysimeter data. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25(5), 2931–2949. https://doi.org/10.5194/hess-25-2931-2021

Grinsted, A., Moore, J. C., & Jevrejeva, S. (2004). Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 11, 561–566. https://doi.org/10.5194/npg-11-561-2004

Instituto Tecnológico Geominero de España & Junta de Andalucía. (1998). *Atlas hidrogeológico de Andalucía.* Instituto Tecnológico Geominero de España.

López-Geta, J. A., Martín-Machuca, M., Mediavilla-Laso, C., Cosano-Prieto, A., & Girón-Méndez, J. L. (2011). *Guías didácticas de los acuíferos del Parque Natural Sierra Norte de Sevilla.* Instituto Geológico y Minero de España; Diputación de Sevilla.

Lorenzo-Lacruz, J., García, C. & Morán-Tejeda, E. (2017). Groundwater level responses to precipitation variability in Mediterranean insular aquifers. *Journal of Hydrology*, 552, 516–531. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.07.011

Pardo-Igúzquiza, E., Durán, J. J., Robledo-Ardila, P., Luque-Espinar, J. A., Martos-Rosillo, S., Guardiola-Albert, C., & Pedrera, A. (2016). El sistema kárstico de la Sierra de las Nieves (Málaga, España). Un ejemplo de un karst mediterráneo de relieve alto. *Boletín Geológico y Minero*, 127(1), 193–204. doi: 10.21701/bolgeomin.127.1.013

Parry, S., Wilby, R. L., Prudhomme, C., & Wood, P. J. (2016). A systematic assessment of drought termination in the United Kingdom. *Hydrology and Earth System Sciences, 20*, 4265–4281. https://doi.org/10.5194/hess-20-4265-2016

Rubio-Campos, J. C., Jiménez-Sánchez, J., Navarro-García, J. A., & Hueso-Quesada, L. M. (2011). *Informe de caracterización hidrogeológica y propuesta de protección de manantiales y lugares de interés hidrogeológico (Granada): GR-10 Parpacén.* Plan de conservación, recuperación y puesta en valor de manantiales y lugares de interés hidrogeológico de Andalucía.

Torrence, C., & Compo, G. P. (1998). A practical guide to wavelet analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79(1), 61–78. https://doi.org/10.1175/1520-0477(1998)079<0061:APGTWA>2.0.CO;2

Van Loon, A. F. (2015). Hydrological drought explained. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water, 2*(4), 359–392. https://doi.org/10.1002/wat2.1085

Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Journal of Climate*, 23(7), 1696–1718. https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1

¿CÓMO SON LOS ENTORNOS CONVECTIVOS SEVEROS EN ESPAÑA? ¿PUEDE ERA5 REPRESENTARLOS CORRECTAMENTE?

Andrés BARRIO-MARTIN[1], Carlos CALVO-SANCHO[1], Nuria P. PLAZA-MARTIN[1], Ana MORATA[2] César AZORÍN-MOLINA[1]

[1]Centro de Investigaciones sobre Desertificación, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CIDE, CSIC-UV-Generalitat Valenciana), Climate, Atmosphere and Ocean Laboratory (Climatoc-Lab), Moncada, Valencia, España.
[2]Departamento de Desarrollo y Aplicaciones, Agencia Estatal de Meteorología, Madrid, España.

andbarriomartin@gmail.com

RESUMEN

Este estudio caracteriza los entornos asociados a convección severa en España a partir del reanálisis ERA5, descargas eléctricas nube-tierra y reportes de tiempo severo. A partir de más de 200 parámetros convectivos, se emplean curvas ROC para identificar los mejores discriminantes entre tormentas no severas y reventones o "downbursts" (DCAPE, cizalladura a −10 °C), granizo grande (WMAXSHEAR), precipitaciones torrenciales (LFC, vector de Bunkers) y tornados (CAPE 0–3 km). Asimismo, se construyen diagramas oblicuos y hodógrafas que sintetizan los perfiles verticales típicos de entornos severos, resaltando los perfiles muy cálidos asociados a downbursts y la marcada curvatura de las hodógrafas en episodios de precipitación de fuerte intensidad horaria. Finalmente, se evalúa la capacidad de ERA5 para representar entornos convectivos frente a radiosondeos, observándose en general un buen acuerdo salvo en índices y parámetros basados en parcelas. Se identifican grandes desviaciones en CIN y fuertes subestimaciones de los valores extremos de CAPE, especialmente en la costa mediterránea, con posibles implicaciones para estudios climatológicos y de evaluación de riesgos.

Palabras clave: ERA5, Downbursts, Granizo, Precipitación Extrema, Tornados

ABSTRACT

This study characterizes the environments associated with severe convective phenomena (downbursts, large hail, heavy precipitation, and tornadoes) in Spain using ERA5, cloud-to-ground lightning, and severe-weather reports. Using more than 200 convective parameters, ROC curves are employed to identify the best discriminants between non-severe storms and downbursts (DCAPE, shear up to −10 °C), large hail (WMAXSHEAR), torrential rainfall (LFC, Bunkers vector), and tornadoes (0–3 km

CAPE). Composite skew-T diagrams and hodographs are also constructed to summarize typical vertical profiles of severe environments, highlighting the very warm profiles associated with downbursts and the pronounced hodograph curvature in extreme-rainfall cases. In addition, we evaluated the ability of ERA5 to represent convective environments relative to radiosonde observations, finding generally good agreement except for parcel-based indices and composite parameters. Large deviations are identified in CIN, along with strong underestimation of extreme CAPE values, particularly along the Mediterranean coast, with potential implications for climatological and hazard-assessment applications.

Key words: ERA5, downbursts, hail, extreme precipitation, tornadoes.

INTRODUCCIÓN

La convección severa conlleva importantes impactos socioeconómicos, generados por vientos convectivos rectilíneos, granizo gigante, precipitaciones torrenciales, tornados y rayos. En España, las fuertes rachas de viento convectivo han causado decenas de muertos y heridos entre 2010-2024 (SINOBAS); el granizo produce graves daños materiales; y las inundaciones del 29 de octubre de 2024 en Valencia dejaron 230 fallecidos y fuertes pérdidas económicas (Fekete et al., 2025). Además, hay evidencia de que el cambio climático intensificará estos fenómenos (Prein, 2023). La caracterización de los entornos convectivos es fundamental para comprender y anticipar estos eventos. Tradicionalmente obtenidos a partir de radiosondeos, los entornos convectivos se extraen hoy con frecuencia de reanálisis como ERA5, que ofrece una cobertura espacial y temporal consistente (Taszarek et al., 2021; Romanic et al., 2022; Martín et al., 2024). En España, ciertos fenómenos severos han sido caracterizados mediante parámetros convectivos, pero los downbursts apenas han sido estudiados con este enfoque, que sí ha sido aplicado en Europa (Pacey et al., 2021). Además, la validez de ERA5 para representar entornos convectivos en la Península Ibérica no ha sido evaluada específicamente bajo condiciones convectivas y podría plantear diferencias respecto estudios más amplios que cubren Europa y Norteamérica (Taszarek et al., 2021).

METODOLOGÍA

En primer lugar, se generó una base de datos de tormentas severas y no severas, incorporando la ubicación y tiempo asociados al entorno pre-convectivo de cada evento. Para ello, se utilizaron los reportes de SINOBAS (Gutiérrez Rubio et al., 2013) y las observaciones de rayos nube-tierra de AEMET, en el periodo 2015-2024. La base de datos se completó con perfiles verticales extraídos tanto de ERA5 como de sondeos reales, y que fueron procesados con el software thundeR (github.com/bczernecki/thunder) para calcular más de 200 parámetros convectivos.

Los entornos asociados a cada fenómeno convectivo se describieron mediante parámetros elegidos por su poder discriminatorio frente a tormentas no severas, seleccionados mediante curvas Receiver Operating Characteristic (ROC) y la métrica del área bajo la curva (AUC), de forma similar a Romanic et al. (2022). Además, los perfiles verticales fueron agregados bajo diagramas skew-T y hodógrafas compuestas, aplicando transformaciones para mantener la forma de la hodógrafa al promediar. Respecto a la evaluación frente a sondeos, se restringió a eventos cercanos a radiosondeos y, tras un control de calidad, se calcularon diversas métricas como el sesgo medio, el error cuadrático medio o el coeficiente de correlación, para diversos parámetros asociados a tiempo severo.

RESULTADOS

Respecto a la caracterización (Tabla 1), los downbursts en verano ocurren en entornos muy cálidos respecto a tormentas no severas, destacando DCAPE y el nivel de engelamiento como parámetros. Fuera del verano, se asocian más bien a cizalladura elevada. El granizo gigante muestra CAPE y cizalladura elevados, resultando WMAXSHEAR el mejor discriminante. Las precipitaciones torrenciales se relacionan con una nivel de convección libre (LFC) bajo y una razón de mezcla elevada, un vector de Bunkers lento y rasgos supercelulares (hodógrafa curvada en 0-1 km). Finalmente, los tornados presentan dificultades para distinguirse de tormentas no severas, con solo ligeramente mayor CAPE 0–3 km y saturación. Respecto a la evaluación de ERA5 frente a sondeos en días de tormenta (Figura 1), los mayores errores aparecen en parámetros de parcela y compuestos, destacando grandes desviaciones en CIN y la subestimación sistemática del CAPE extremo (-200 J kg-1 de media), perdiendo cerca del 70% de los casos > 3.000 J kg^{-1} debido a sesgos en la capa límite. Esta limitación es marcada en la costa mediterránea (sesgo de -700 J kg-1), con implicaciones para estudios climatológicos y de evaluación de riesgos.

Fenómeno	Parámetro (AUC)	Diferencias frente a tormentas no severas
Downbursts (verano)	DCAPE (0.80), nivel de engelamiento (0.78)	Perfil muy cálido, V invertida
Downbursts (no verano)	Cizalladura a -10ºC (0.69)	Hodógrafa larga, recta
Granizo	WMAXSHEAR (0.81)	Mayor humedad en capas bajas y hodógrafa larga
Precip. Torrenciales	Tª del Nivel de Convección Libre (0.70)	Elevada humedad y saturación, hodógrafa muy curvada, flujo del este
Tornados	MU CAPE 0-3 km (0.69)	Muy similares

Tabla 1: Mejores discriminantes entre fenómenos convectivos severos y tormentas no severas y diferencias en perfiles. Elaboración propia.

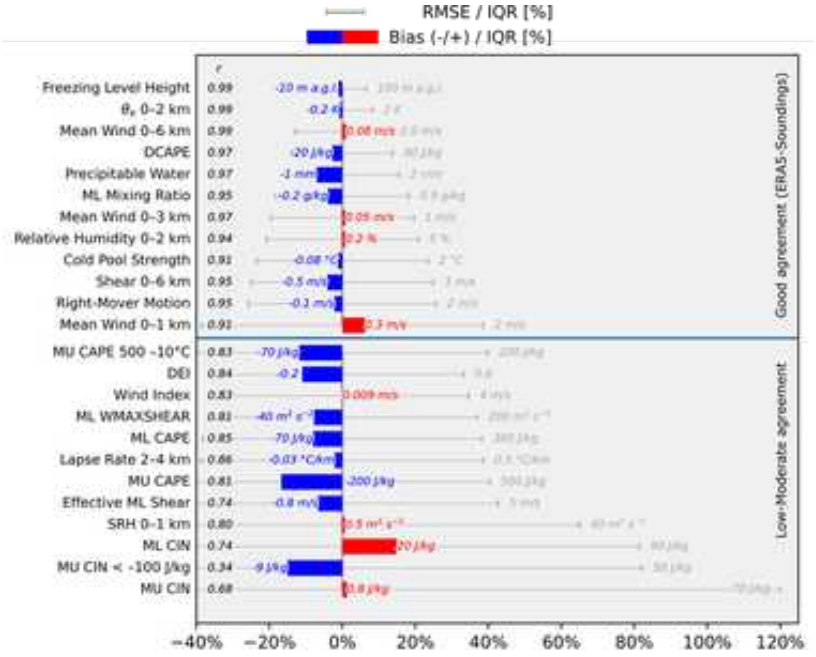


Figura 1. Evaluación de ERA5 frente a sondeos, en función de parámetros convectivos. Elaboración propia.

DISCUSIÓN

Se han encontrado algunos patrones consistentes de fenómenos severos, como el perfil en V en downbursts o los entornos muy húmedos y favorables a sistemas lentos en asociación a precipitaciones súbitas torrenciales, que resultan comunes a la literatura sobre convección severa. Sin embargo, en España se han descubierto peculiaridades regionales como: (i) la asociación de downbursts a entornos muy cálidos, y un DCAPE climatológicamente elevado, que fuera del verano compensa cizalladuras no tan severas en comparación a estudios como Pacey et al. (2021); (ii) el flujo Mediterráneo como precursor de la inestabilidad en eventos de granizo grande (Martín et al., 2024) y como fuente de humedad en las precipitaciones torrenciales o (iii) la baja sensibilidad de los entornos tornádicos a índices y parámetros específicamente designados. Las subestimaciones de CAPE extremo por sesgos en la capa límite confirman los resultados de Taszarek et al. (2021), esta vez centrados en España y en casos puramente asociados a convección.

CONCLUSIONES

Este trabajo contribuye a la caracterización regional de entornos convectivos severos, proporcionando una selección de los parámetros con mejor poder discriminativo y peculiaridades de sus perfiles verticales, resumidos en la Tabla 1. Algunos fenómenos muestran mayores dificultades para distinguirse de tormentas no severas, como los

downbursts fuera de verano o los tornados, siendo esta una vía futura a mejorar, así como simulaciones. La evaluación de ERA5 es favorable para muchos parámetros convectivos, en especial termodinámicos y cinemáticos, comprobando así que este reanálisis es apto para la caracterización de entornos convectivos. Sin embargo, en situaciones de CAPE extremo, sus grandes subestimaciones deben ser tenidas en cuenta, de acuerdo con otros estudios.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por una ayuda PROMETEO (Ref. CIPROM/2023/38; proyecto DOWNBURST) para grupos de investigación de excelencia de la Generalitat Valenciana (GVA), CSIC-LINCGLOBAL Ref. LINCG24042 y la PTI-Clima del CSIC. A. Barrio-Martin agradece la beca JAE-Intro concedida por el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (BDNS 753215 – BOE 19-04-2024). C. Calvo-Sancho agradece el apoyo de la ayuda PID2023-146344OB-I00 (CONSCIENCE), financiada por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y por “FEDER Una manera de hacer Europa”, así como de los Proyectos Especiales del ECMWF (SPESSANC). N. P. Plaza-Martín agradece a la Comisión Europea-NextGenerationEU (Regulación EU 2020/2094) por el apoyo a través del Programa Momentum CSIC: Desarrollo del Talento Digital. Se agradece a AEMET la concesión de datos de rayos nube-tierra y de los reportes públicos de SINOBAS.

REFERENCIAS

Fekete, A., Estrany, J., & Ramírez, M. Á. A. (2025). Cascading impact chains and recovery challenges of the 2024 Valencia catastrophic floods. *Discover Sustainability*, *6*(1), 586. https://doi.org/10.1007/s43621-025-01483-4

Gutiérrez Rubio, D., Riesco Martín, J., Díez Muyo, E., Martín León, F., Núñez Mora, J. Á., Sánchez-Laulhé, J. M., & Ferri Llorens, M. (2013). Breve guía descriptiva de los fenómenos meteorológicos recogidos en el Sistema de notificación de observaciones atmosféricas singulares SINOBAS. https://doi.org/10.31978/281-13-009-0

Martín, M. L., Calvo-Sancho, C., Taszarek, M., González-Alemán, J. J., Montoro-Mendoza, A., Díaz-Fernández, J., Bolgiani, P., Sastre, M., & Martín, Y. (2024). Major Role of Marine Heatwave and Anthropogenic Climate Change on a Giant Hail Event in Spain. *Geophysical Research Letters*, *51*(6), e2023GL107632. https://doi.org/10.1029/2023GL107632

Pacey, G. P., Schultz, D. M., & Garcia-Carreras, L. (2021). *Severe Convective Windstorms in Europe: Climatology, Preconvective Environments, and Convective Mode*. https://doi.org/10.1175/WAF-D-20-0075.1

Prein, A. F. (2023). Thunderstorm straight line winds intensify with climate change. *Nature Climate Change*, *13*(12), 1353-1359. https://doi.org/10.1038/s41558-023-01852-9

Romanic, D., Taszarek, M., & Brooks, H. (2022). Convective environments leading to microburst, macroburst and downburst events across the United States. *Weather and Climate Extremes*, *37*, 100474. https://doi.org/10.1016/j.wace.2022.100474

Taszarek, M., Pilguj, N., Allen, J. T., Gensini, V., Brooks, H. E., & Szuster, P. (2021). Comparison of Convective Parameters Derived from ERA5 and MERRA-2 with Rawinsonde Data over Europe and North America. *Journal of Climate*, *34*(8), 3211-3237. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0484.1

DESPLAZAMIENTOS MEDIOAMBIENTALES: MIGRACIÓN COMO TÉCNICA ADAPTATIVA A TRAVÉS DE LAS REUBICACIONES PLANIFICADAS

Carlota DÍAZ GARCÍA[1]

[1]Estudiante del Máster de Acceso a la Abogacía y Procura de la Universidad de La Laguna y del Máster de Estudios Avanzados de Derecho público de la Universidad Carlos III de Madrid

carlotadgcia@gmail.com

RESUMEN

El objetivo de la presente investigación es analizar las reubicaciones planeadas como una de las técnicas adaptativas frente a los desplazamientos medioambientales generados por el cambio climático. Para ello, primero conceptualizaremos el fenómeno de los desplazamientos medioambientales, centrándonos en aquellos que se ubican en zonas en las que no se prevea posible el mantenimiento o retorno de la población. En segundo lugar, introduciremos las reubicaciones planificadas de habitantes, infraestructuras y servicios de zonas vulnerables, entendiendo así la migración medioambiental no como un mero proceso individual o grupal sobrevenido, sino como una técnica adaptativa colectiva y organizable, poniendo así de manifiesto la necesidad de coordinación y cooperación de los Estados con las poblaciones afectadas para fomentar su capacidad de agencia y resiliencia. Abordaremos cómo llevar a cabo de manera correcta estas reubicaciones, teniendo en cuenta la necesidad del establecimiento de marcos legales que las amparen, la importancia de la participación de las poblaciones afectadas en su proceso de reubicación y la selección del lugar idóneo para ello. Por último, haremos referencia a los retos y las oportunidades existentes, así como los logros y las lecciones aprendidas en base a las experiencias de reubicación ya realizadas en diferentes zonas del Caribe.

Palabras clave: desplazamientos ambientales, reubicaciones planificadas, técnicas adaptativas, ordenación del territorio, resiliencia.

ABSTRACT

The goal of the present investigation is to analyze planned relocation as one of the possible adaptive techniques in response to environmental displacements caused by climate change. To this end, we will first conceptualize the phenomenon of environmental displacements, focusing on those that take place in areas where the remaining or returning of the population is no longer foreseeable. Secondly, we will introduce the concept of planned relocation, which recontextualizes environmental migration as a collective and organizational adaptive technique, rather than a

necessarily sudden and haphazard process. This concept inherently emphasizes the need for coordination and cooperation between states and affected populations to promote self-agency and resilience. We will address how these relocations must take place in order to be done correctly, taking into account the necessity of specific legal backing, the importance of the active participation of affected populations in their relocation process, and the selection of the most suitable location. Finally, we will address the existing challenges and opportunities, as well as the achievements and lessons learned from relocations that have already been carried out in different parts of the Caribbean.

Key words: environmental displacement, planned relocations, adaptive techniques, land-use planning, resilience.

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas hemos podido observar como el cambio climático ha pasado de ser un fenómeno cuestionado para convertirse en una realidad innegable, cuyos efectos adversos han ido aumentando hasta convertirse en una grave amenaza. Que el territorio se vuelva inhabitable tiene un impacto desastroso en la vida de sus poblaciones, especialmente cuando estas ya partían de una posición de vulnerabilidad. Motivadas por la pérdida de sus vidas tal y como la concebían hasta ese momento, cada vez más personas se ven obligadas a desplazarse. De acuerdo a las estimaciones del IDMC, fueron 32 millones de personas las que en 2022 migraron a causa de desastres climáticos, produciéndose la mayor parte de estas migraciones en el este de Asia y el Pacífico, el sur de Asia y en África subsahariana (Expert Council on Integration and Migration, 2023).

Sin embargo, para poder entender de manera correcta las dinámicas de los desplazamientos migratorios, debemos abordarlos desde un enfoque pluralista: la migración no obedece a una causa principal como única y excluyente, sino a la convergencia de varias que se refuerzan mutuamente. En este sentido, es necesario tener en cuenta no solo la degradación ambiental del territorio concreto, sino también las circunstancias políticas, demográficas, económicas y sociales que le asisten. Resulta también relevante la manera en la que otros factores determinantes de especial vulnerabilidad, como la clase, la etnia, la indigenidad, el género o la identidad pueden atravesarla (Piguet E. et. al., 2011). Esta nueva realidad, que plantea numerosos retos, debe de ser abordada por los Estados y la Comunidad Internacional en base a tres objetivos: la mitigación de los procesos que agravan los efectos del cambio climático, la adaptación a las amenazas que estos plantean sobre el territorio y la protección de las personas afectadas. Una de las herramientas disponibles para la consecución de estos objetivos es la reducción de peligros a través de una planificación urbanística centrada en prevenir, controlar y reducir los factores de

riesgo, implementando políticas que integren las amenazas como un elemento con el que se convive y permitiendo a la sociedad enfrentarlas, minimizando así las pérdidas y los daños que causen.

Para ello, será necesario hacerlo desde una perspectiva transversal que busque primeramente prevenir los desplazamientos, adaptando el territorio y proporcionando herramientas a la población para que puedan permanecer el mayor tiempo posible y, en segundo lugar, creando mecanismos seguros que prevean el tránsito, tanto dentro de su propio Estado como internacionalmente (Kälin W., Schrepfer, N, 2012). Esto deberá hacerse desde el entendimiento de la migración como una técnica adaptativa, es decir, como un factor que si es adecuadamente gestionado puede contribuir a prevenir desastres y a reducir su impacto, aumentando la resiliencia de las personas y comunidades frente a los efectos del cambio climático. Es aquí donde se sitúan las reubicaciones planeadas, que podemos definir como "un proceso planificado de traslado de grupos de personas desde sus hogares o residencia temporal a un nuevo lugar, brindándoles las condiciones necesarias para reconstruir sus vidas (…) llevándose a cabo bajo la autoridad del Estado y dentro de sus fronteras nacionales, con el fin de proteger a las personas de los riesgos e impactos relacionados con los desastres y el cambio ambiental" (UNHCR ACNUR, 2017).

Aunque cuando hablamos de reubicaciones normalmente nos limitamos a desplazamientos internos es cierto que, en casos excepcionales, también puede ocurrir a través de fronteras internacionales, como podría ser el de los pequeños Estados insulares. Sin embargo, este tipo de reubicaciones todavía no han tenido lugar y plantean problemas mucho más amplios, especiamente respecto a todos aquellos elementos relacionados con la condición de Estado y los derechos que derivan de esta. Es por ello que, por ahora, la mayor parte de experiencias involucran a comunidades pequeñas que se desplazan en distancias cortas (Ferris, E., 2025). Dentro de esto, nos centraremos en los países del Caribe, dado que desde tiempo atrás vienen teniendo en consideración a la figura de la reubicación planeada en sus estrategias contra los efectos del cambio climático, tanto de manera teórica como práctica, encontrándose en desarrollo o habiéndose desarrollado ya numerosos reasentamientos poblacionales. Aunque la aproximación a estas experiencias es limitada dada su novedad, las lecciones aprendidas a través de estas son imprescindibles de cara a futuras reubicaciones.

METODOLOGÍA

La metodología utilizada para la realización de este trabajo es de tipo cualitativo, basándose en la utilización del método hermenéutico. A través de la exploración, análisis y revisión documental y bibliográfica de normativa internacional y nacional, informes de organismos públicos, bases de datos y archivos de organizaciones

internacionales relacionados con la materia, se realiza un estudio de las políticas de diferentes países y los resultados de la ejecución de estas. Para ello, se ha recurrido, entre otras, a la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) y las respectivas Contribuciones Determinadas a nivel Nacional (DNC), los Marcos de Política de Reasentamiento (MPR) y los Planes de Reasentamiento (PAR) del Banco Internacional Europeo (BEI) así como a la Organización Internacional para las Migraciones (OIM), Agencia de la ONU para los Refugiados (ACNUR), y a revistas especializadas en materia de cambio climático y migraciones.

RESULTADOS

De la revisión de la literatura existente sobre las reubicaciones planeadas, podemos concluir que estas han de ser una opción de último recurso. Lo principal es establecer los mecanismos suficientes para paliar factores de riesgo y que la población pueda quedarse en su lugar de origen el mayor tiempo posible. Sin embargo, en el caso de que esta inmovilidad deje de ser una opción, una reubicación bien planeada y ejecutada puede convertirse en una hoja de ruta colectiva que reduce la indefensión sobrevenida a causa de los efectos del cambio climático y el consecuente desplazamiento forzado, haciendo que las personas afectadas sean agentes directos de su propio proceso migratorio (UNHCR ACNUR, 2015). Es imprescindible tener en cuenta que las reubicaciones planeadas pueden poner en peligro derechos humanos muy diversos, además de tener profundas consecuencias sociales y culturales. Para considerar una reubicación como exitosa, las personas reubicadas no solo deben enfrenten un menor riesgo climático, sino que deben poder mantener al menos el mismo nivel de vida que tenían antes (Correa, E., 2011). Dentro de esto, de las experiencias observadas en el Caribe, se extraen ciertos elementos fundamentales que deben darse para poder llevarlas a cabo de manera correcta:

En primer lugar, las reubicaciones deben estar amparadas por un marco jurídico e institucional sólido, capaz de mantenerse a través de posibles cambios políticos, integrado tanto por la normativa ya existente como a través de la adopción de nuevas leyes específicas sobre reubicación planeada. Estas leyes deben recoger las obligaciones de los Estados respecto de las poblaciones que requieran una reubicación determinando, entre otros, los mecanismos a través de los que las comunidades podrán solicitar al Estado que lleve a cabo una reubicación, así como las medidas que garanticen la información, consulta y participación de las personas afectadas por la reubicación en su proceso; la identificación de los agentes estatales responsables de la toma de decisiones; la provisión de financiación suficiente para poder llevar a cabo la reubicación; los mecanismos para la adquisición de las tierras, así como los criterios para la elegibilidad de las personas reubicadas para su asignación y las formas de tenencia; y el establecimiento de mecanismos de monitoreo respecto tanto de la implementación del plan de reubicación (UNHCR ACNUR, 2017).

Respecto a la planificación y ejecución de la reubicación planificada, encontramos que resulta imprescindible la participación significativa de la población en todas las fases del proceso, dado que la voluntad de reubicarse dependerá de la percepción de control e involucramiento que pueda tener la comunidad (OIM ONU, 2019). Para ello, en primer lugar, es necesario que el plan tenga en cuenta las características específicas de la población que va a ser reubicada, así como las de las comunidades receptoras. Será necesario llevar a cabo un censo que recopile información que permita conocer a la población que debe ser reubicada, incluyendo información demográfica, socioeconómica y cultural relevante. Este censo deberá tener en cuenta la organización social y familiar, especialmente las jefaturas del hogar; sus niveles formativos; las fuentes y niveles de ingresos; las actividades productivas que se llevan a cabo; la demanda y el uso de recursos y servicios; los lazos emocionales que existan entre la comunidad y respecto de su tierra; sus costumbres y su manera de entender el hogar y la vida.

Por otro lado, también es necesario establecer mecanismos de consulta, participación y atención de quejas. En este sentido, se deberán mantener reuniones con las personas afectadas de manera asidua para tomar decisiones respecto de la elección del lugar de reubicación, las alternativas habitacionales y la participación directa o indirecta de las personas afectadas en la implementación del plan, así como para informar sobre el progreso del proyecto y plantear problemas y posibles soluciones conforme vayan surgiendo (UNHCR ACNUR, 2015).

DISCUSIÓN

La ejecución real de la reubicación planeada debe de ser un recurso de ultima ratio. Lo principal es que las poblaciones puedan mantenerse en su lugar de origen el mayor tiempo posible. Para poder determinar la necesidad de la reubicación deben llevarse a cabo estudios analíticos y evaluaciones que se basen en factores claros y transparentes previamente definidos, como la determinación de los niveles de riesgo existentes y esperables a través de pruebas científicas; la vulnerabilidad y resiliencia de la población y el umbral de riesgo aceptable; la posibilidad de implementar otras medidas adaptativas; la disponibilidad de opciones para llevar a cabo la reubicación y los costos materiales, socio-económicos y ambientales esperados.

Los Estados deben de proporcionarle a las personas desplazadas las condiciones necesarias para que puedan construir una vida digna en el lugar de reasentamiento, garantizando el restablecimiento de sus medios de vida, e incluso aspirando a su mejoramiento. De nada sirve llevar a cabo una reubicación si el nuevo lugar resulta inhabitable porque no reúne los requisitos necesarios para el mantenimiento de una cierta calidad de vida. Muchas de las reubicaciones practicadas hasta la fecha se centran únicamente en la creación de viviendas, dejando de lado otros factores que

en la práctica resultan decisivos en el mantenimiento de la población en el lugar al que han sido reubicados: las oportunidades laborales y el acceso y ampliación de recursos y servicios. En este sentido, también resulta relevante la realización de actividades formativas y de capacitación, especialmente cuando el reasentamiento pueda suponer la pérdida de los trabajos tradicionalmente ejercidos o para mejorar la competitividad cuando se lleve a cabo la integración con otra población.

CONCLUSIONES

Aunque a día de hoy las experiencias son limitadas, los resultados más o menos exitosos y los desafíos enfrentados nos permiten sacar conclusiones que se conforman como lecciones aplicables a futuras ocasiones. Los elementos anteriormente planteados pueden resultarnos muy ambiciosos y de difícil cumplimiento, especialmente teniendo en cuenta la falta de voluntad política a la que nos enfrentamos habitualmente cuando se trata de esta materia. Sin embargo, y teniendo en cuenta que, a pesar de ser una opción de último recurso, los efectos del cambio climático son cada vez más devastadores, podemos esperar que las reubicaciones planificadas se vuelvan cada vez más frecuentes. Por ello, parece urgente comenzar a establecer planes que nos permitan dar una respuesta adecuada a una situación tan vulnerable como supone la pérdida del territorio.

Todas las experiencias hasta ahora apuntan a la misma conclusión: para que la reubicación sea una solución duradera, es necesario crear mecanismos de planificación que garanticen la mejora de la calidad de vida de las personas reubicadas, paliando las situaciones de desigualdad y la exposición a nuevos riesgos. Para ello es imprescindible garantizar la financiación detrás de la reubicación, el mantenimiento y la creación de oportunidades y, sobre todo, la participación de las personas afectadas como agentes directos de su propio proceso de reubicación, teniendo en consideración la manera en la que viven, sus necesidades y sus estrategias para fomentar su resiliencia.

REFERENCIAS

Correa, E., (2011), *“Reasentamiento preventivo de poblaciones en riesgo de desastre: Experiencia de América Latina”,* GFDRR, https://www.gfdrr.org/sites/default/files/documents/Preventive%20Resettlement%20%28Spanish%29.pdf

Ferris, E., (2025), *“Reubicación planificada: dificultades garantizadas”,* CIDOB, https://www.cidob.org/publicaciones/apuntes-reubicacion-planificada-dificultades-garantizadas

Kälin W., Schrepfer, N., (2012), *"Protecting People Crossing Borders in the Context of Climate Change. Normative Gaps and Possible Approaches",* Legal and Protection Policy Research Series nº 24, Division of International Protection, UNHCR.

Piguet E. et. al., (2011), *"Migración y cambio climático",* Refugee Survey Quarterly, Vol. 30, No. 3 https://environmentalmigration.iom.int/sites/g/files/tmzbdl1411/files/documents/2023-09/migracionescc-migrationoffprint.pdf

OIM ONU Migración, (2019), *"Reubicación planificada: cuatro puntos a considerar en un ambiente cambiante",* https://caribbeanmigration.org/blog/planned-relocation-four-points-consider-changing-environment

The Expert Council on integration and Migration, (2023), *"Climate change and migration: What we know about the connection and what options there are for action"* https://www.svr-migration.de/en/publication/annual-report-2023/

UNHCR ACNUR, (2015), *"Guía sobre protección de personas por medio de la relocalización planificada ante desastres y cambio ambiental", https://www.refworld.org/es/pol/dirope/acnur/2015/es/117656*

UNHCR ACNUR, (2017), *"Caja de herramientas: Relocalizaciones Planificadas para proteger a las personas de los desastres y el cambio ambiental",* https://environmentalmigration.iom.int/sites/g/files/tmzbdl1411/files/Planned%20Relocations%20Toolbox%20-%20Spanish%20Version.pdf

INTEGRATING MULTI-SOURCE CLIMATE DATA AND PREDICTIVE MODELS TO ASSESS BIOCLIMATIC STRESS IN MEDITERRANEAN VINEYARDS: AN INTEGRATED MULTI-SOURCE STUDY IN PADUL (GRANADA, SPAIN)

Lucía MORENO-CUENCA[1], Thodoris MAXIMILIANOS CHYTIS[2], Jesús RODRIGO-COMINO[1]

[1]Departamento de Análisis Geográfico Regional y Geografía Física, Andalusian Research Institute in Data Science and Computational Intelligence (DaSCI), University of Granada, 18071 Granada, Spain
[2]School of Chemical and Environmental Engineering, Technical University of Crete, Chania, Greece

luciamc1012@ugr.es, jesusrc@ugr.es, tchytis@tuc.gr

ABSTRACT

Mediterranean viticulture is increasingly exposed to climate-driven risks associated with warming, intensifying heat extremes, and growing atmospheric water demand. This study assesses recent bioclimatic trends and climate-related stress in a vineyard area of Padul (Granada, southern Spain) using an integrated multi-source dataset. We hypothesize that ongoing warming is increasing thermal and hydric stress during the growing season, with implications for grapevine development and local agricultural resilience.

The analysis combines a long-term daily climate record (2001–2023) with a recent high-resolution local dataset (2023–2024), merged through a workflow including variable harmonization, daily resampling, outlier correction, climatological imputation, and ET_0 calibration using a modified Hargreaves approach. Key indicators were computed, including Growing Degree Days, Huglin Index, Cool Night Index, and seasonal water balance.

Results show a clear intensification of thermal stress. Hot days (Tmax > 35 °C) increased from 20 to 34 days between 2020 and 2023, while tropical nights (Tmin > 20 °C) rose from 7 to 19 nights over the same period. Maximum temperature shows a significant positive trend, whereas annual precipitation shows a significant decline. Bioclimatic indices also indicate increasing thermal accumulation and warmer late-season nights, while seasonal water balance remains persistently negative, pointing to sustained hydric stress. In addition, compound indicators such as hot-dry days and hot days with high ET_0 show higher values in the most recent period.

Key words: climate change; Mediterranean viticulture; bioclimatic indices; heat extremes; regional geographical analysis

INTRODUCTION

Mediterranean viticulture is highly sensitive to climate variability and ongoing climate change, particularly in regions already exposed to high summer temperatures, seasonal water deficits, and increasing frequency of extreme events (Prada et al., 2024). In southern Spain, recent warming trends and the intensification of heat-related extremes are raising concerns about the future suitability of traditional vineyard areas, as well as about the effects of climate stress on grapevine development, ripening dynamics, and overall agroecosystem resilience (Fraga et al., 2013).

In this context, bioclimatic indices have become valuable tools for assessing the climate suitability of viticultural areas and for identifying changes in thermal and hydric stress conditions (Moral et al., 2014; Malheiro et al., 2010). Indices such as the Huglin Index, Growing Degree Days, Cool Night Index, and water balance-related indicators are widely used to characterize viticultural climates and to evaluate how changing thermal regimes may affect grapevine phenology and grape quality (del Río et al., 2024; Tonietto, 1999; Riou et al., 1994). At the same time, climate risk approaches increasingly emphasize the role of extremes and compound events as key drivers of agricultural vulnerability (Ramos, 2025).

This study focuses on a viticulture area in the inland territories of the province of Granada (southern Spain), where also different processes of land degradation are quite active (Parra Ortega et al., 2024; Cambronero et al., 2025). The main objective is to assess recent climatic and bioclimatic changes using an integrated multi-source meteorological dataset. Specifically, the study aims to: (i) identify recent trends in key climatic variables, (ii) quantify changes in heat-related extremes, (iii) evaluate thermal and hydric stress through selected bioclimatic indicators, and (iv) explore the recent intensification of compound stress conditions during the growing season.

METHODS

The analysis was based on two complementary meteorological datasets. The first one consisted of a long-term daily climate series spanning 2001-2023, which provided the multidecadal context required for trend assessment. The second dataset consisted of high-resolution local observations for 2023-2024, which captured recent microclimatic variability during the most recent growing seasons. Both datasets were harmonized and merged into a continuous daily time series.

Data processing included variable harmonization, temporal resampling to daily frequency, outlier correction, and climatological imputation of missing values where necessary. Reference evapotranspiration (ET_0) was estimated using a modified Hargreaves approach, allowing the incorporation of evaporative demand into the

analysis of hydric stress. The final merged dataset included daily values of mean, maximum, and minimum air temperature, precipitation, relative humidity, wind speed, solar radiation, and ET_0. The use of ET_0 follows standards agroclimatic practice, as atmospheric evaporative demand is a key variable in drought and crop-stress assessments (Allen et al., 1998; Vicente-Serrano et al., 2010).

Climatic trends were assessed for annual mean, maximum, minimum temperature, precipitation, and ET_0 using the Mann-Kendall test and Sen's slope estimator, both widely used in hydroclimatic trend analysis. Heat-related extremes were quantified through threshold-based indicators, including hot days (Tmax > 30, 35 and 38 °C), tropical nights (Tmin > 20 °C), and very warm nights (Tmin > 18 °C). This threshold-based approach is consistent with the broader literature on climate extremes and complements standardized ETCCDI-type indicators (Zhang et al., 2011).

Bioclimatic stress during April-September growing seasons was evaluated using Growing Degree Days (base 10 ºC), Huglin Index, Cool Night Index, and seasonal water balance (P - ET_0). These indices are commonly used to characterize viticultural climates and to assess the effects of warming on grapevine development and ripening conditions (Huglin, 1978; Tonietto & Carbonneau, 2004).

In addition, compound stress conditions were analysed using combined indicators such as hot-dry days (Tmax > 35 °C and P = 0), hot days with high ET_0, and warm nights with high ET_0. To highlight recent changes, results were compared across three periods: 2001–2010, 2011–2020, and 2021–2024.

RESULTS

Table 1 summarizes the main climatic signals detected in the study area. Annual maximum temperature showed a significant increasing trend according to the Mann-Kendall test, with a Sen's slope of 0.046 °C yr^{-1}, whereas annual precipitation showed a significant decreasing trend, with a Sen's slope of −7.084 mm yr^{-1}. In addition, the study area presented a mean annual maximum temperature of 22.55 ± 0.68 °C and a mean annual precipitation of 404.8 ± 121.3 mm. Relative changes in selected indicator also revealed a marked intensification of thermal and compound stress conditions, with increases of 70% in hot days above 35 °C, 107.1% in tropical nights above 20 °C, 6.8% in the Huglin Index, and 68% in hot-dry days.

Indicator	Metric	Result
Maximum temperature	Mean ± SD	22.55 ± 0.68 °C
Maximum temperature	Mann–Kendall + Sen's slope	Increasing; p = 0.0299; slope = 0.046 °C yr^{-1}
Precipitation	Mean ± SD	404.8 ± 121.3 mm
Precipitation	Mann–Kendall + Sen's slope	Decreasing; p = 0.0265; slope = −7.084 mm yr^{-1}
Hot days > 35 °C	Relative change	+70%
Tropical nights > 20 °C	Relative change	+107.1%
Huglin Index	Relative change	+6.8%
Hot-dry days	Relative change	+68%

Table 1. Summary of selected climatic trends and changes in key climate stress indicators. Source: Authors' own elaboration from integrated multi-source climatic data for Padul (Granada, Spain).

Figure 1 shows the annual evolution of maximum temperature and precipitation during the study period. Maximum temperature displayed a clear positive tendency despite marked interannual variability, with the highest values concentrated in the most recent years. In contrast, annual precipitation showed a general downward tendency, although with substantial year-to-year fluctuations, including both relatively wet and markedly dry years. This combination indicates that recent climatic conditions in the study area have become progressively warmer under an overall reduction in water availability.

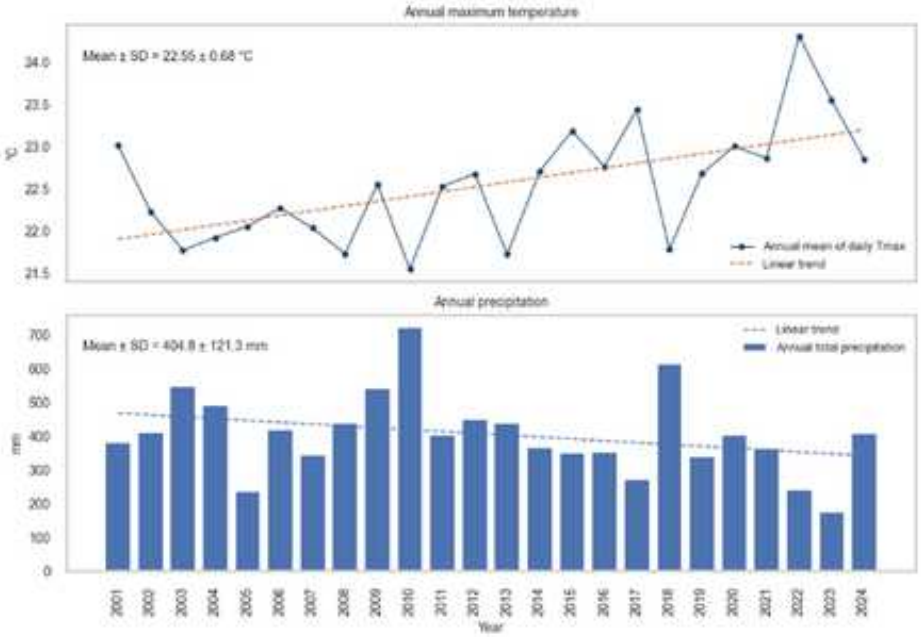


Figure 1. Annual maximum temperature and annual precipitation in Padul (Granada, Spain) during the study period. Source: Authors' own elaboration based on the merged climate dataset (2001–2024).

Figure 2 complements these results by showing the annual standardized anomalies of selected climate stress indicators. Although the four indicators exhibit pronounced interannual variability, positive anomalies become more frequent and more intense in the most recent part of the record. This pattern is especially evident for hot days above 35 °C, tropical nights above 20 °C, and hot-dry days, while very hot days above 38 °C also show strong positive anomalies in recent years. The results demonstrate that the current period is characterized not only by warmer background conditions, but also by a greater recurrence of years with elevated thermal and compound stress.

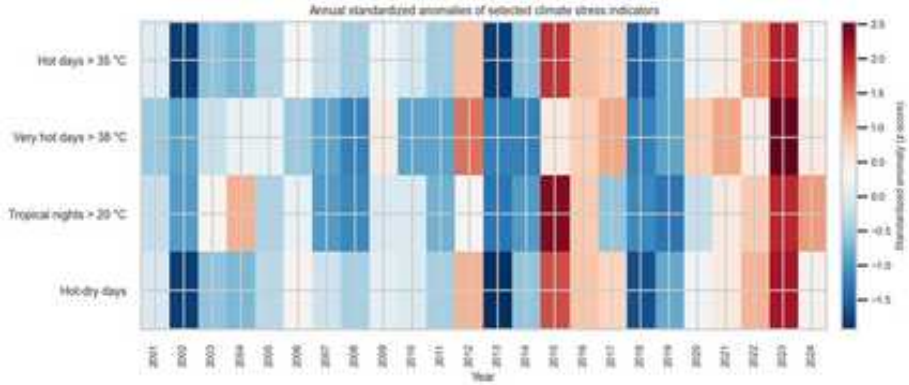


Figure 2. Annual standardized anomalies of selected climate stress indicators during the study period.Source: Authors' own elaboration based on the merged climate dataset (2001–2024).

DISCUSSION

The results indicate a recent intensification of climate-related stress in the Padul vineyard area, mainly driven by increasing thermal conditions and declining water availability. The significant rise in annual maximum temperature, together with the decrease in annual precipitation, is consistent with broader trends described for Mediterranean and European viticultural regions, where warming and increasing drought stress are progressively constraining grapevine development and ripening conditions (Fraga et al., 2013; Prada et al., 2024). In this context, the increase in hot days, tropical nights, and hot-days suggests that recent climatic conditions are becoming progressively less favourable for maintaining stable vine performance without adaptation measures. The positive change in the Huglin Index also points to increasing thermal accumulation during the growing season, reinforcing the idea of a shift toward warmer viticultural conditions. Although the annual standardized anomalies reveal strong interannual variability, the concentration of positive anomalies in recent years supports the interpretation that thermal and compound stress are not isolated events, but part of an emerging recent pattern, which may have implications for grapevine phenology, water demand, and local viticultural resilience (Ramos, 2025).

CONCLUSIONS

This study confirms that the Padul vineyard area is undergoing recent climatic changes characterized by increasing temperatures, decreasing precipitation, and a growing frequency of heat-related and compound stress conditions during the growing season. The observed rise in hot days, tropical nights, and hot-dry days, together with the increase in the Huglin Index and the persistently negative seasonal water balance, indicates a progressive intensification of both thermal and hydric stress. Overall, the integrated multi-source approach proved effective for detecting recent climatic signals at the local scale and provides a useful basis for future assessments of viticultural vulnerability and adaptation under Mediterranean climate change conditions.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was produced with the support of a 2021 Leonardo Grant for Researchers and Cultural Creators from the BBVA Foundation, which is gratefully acknowledged. The authors also thank the projects granted by the University of Granada within the Plan Propio: (i) PP2022.EI-01, *Caracterizando la degradación ambiental en el viñedo granadino. Un enfoque multidisciplinar a largo plazo utilizando parcelas experimentales y muestreos poblacionales*; and (ii) PPJIA2022-58, *Caracterización hídrica del suelo en viñedos para la optimización de recursos agrícolas y ambientales.* In addition, the authors acknowledge the support of the Proyectos Innovadores 2022–2025 de Grupos Operativos AEI-Agri (Andalucía) through the project Creación de una

herramienta DSS (Decision Support System) para el manejo sostenible del suelo en viticultura. This work is also linked to the Marie Curie Staff Exchange project SOSVITI and to the Horizon Europe project SOILCRATES (Project No. 101157354).

REFERENCES

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements* (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56). Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Cambronero, L., Yu, Y., & Rodrigo-Comino, J. (2025). *Scaling up analysis of human impacts on hydrological connectivity in Mediterranean viticultural landscapes: From hillslope to a watershed perspective*. *Ecohydrology & Hydrobiology, 25*, 100700.

del Río, R., Álvarez-Esteban, R., Alonso-Redondo, R., Álvarez, R., Rodríguez-Fernández, M. P., González-Pérez, A., & Penas, A. (2024). Applications of bioclimatology to assess effects of climate change on viticultural suitability in the DO León (Spain). *Theoretical and Applied Climatology*. https://doi.org/10.1007/s00704-024-04831-y

Fraga, H., Malheiro, A. C., Moutinho-Pereira, J., & Santos, J. A. (2013). An overview of climate change impacts on European viticulture. *Food and Energy Security, 1*(2), 94–110. https://doi.org/10.1002/fes3.14

Huglin, P. (1978). Nouveau mode d'évaluation des possibilités héliothermiques d'un milieu viticole. *Comptes Rendus de l'Académie d'Agriculture de France, 64*(13), 1117–1126.

Malheiro, A. C., Santos, J. A., Fraga, H., & Pinto, J. G. (2010). Climate change scenarios applied to viticultural zoning in Europe. *Climate Research, 43*(3), 163–177. https://doi.org/10.3354/cr00918

Moral, F. J., Rebollo, F. J., Paniagua, L. L., García, A., & Honorio, F. (2014). Climatic spatial variability in Extremadura (Spain) based on viticultural bioclimatic indices. *International Journal of Biometeorology, 58*, 2139–2152. https://doi.org/10.1007/s00484-014-0814-8

Parra Ortega, J., Cambronero, L., Alcarria Salas, M., Rodríguez, J. L., Durán-Zuazo, V. H., Keesstra, S. D., & Rodrigo-Comino, J. (2024). Conducting an in situ evaluation of erodibility in a Mediterranean semi-arid and conventional vineyard in Granada province (Southern Spain) through rainfall simulation experiments. *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration, 9*, 797–808. https://doi.org/10.1007/s41207-024-00485-4

Prada, J., Dinis, L.-T., Soriato, E., Vandelle, E., Soletkin, O., Uysal, Ş., Dihazi, A., Santos, C., & Santos, J. A. (2024). Climate change impact on Mediterranean viticultural regions and site-specific climate risk-reduction strategies. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 29*, Article 52. https://doi.org/10.1007/s11027-024-10146-0

Ramos, M. C. (2025). The influence of weather conditions and available soil water on *Vitis vinifera* L. Albillo Mayor in Ribera del Duero DO (Spain) and potential changes under climate change: A preliminary analysis. *Agriculture, 15*(11), 1229. https://doi.org/10.3390/agriculture15111229

Riou, C., Becker, N., Sotes Ruiz, V., Gómez-Miguel, V., Carbonneau, A., Panagiotou, M., Calò, A., Costacurta, A., Castro de, R., Pinto, A., Lopes, C., & Carneiro, L. (1994). *Le déterminisme climatique de la maturation du raisin: Application au zonage de la teneur en sucre dans la Communauté européenne*. Office for Official Publications of the European Communities.

Tonietto, J. (1999). Les conditions thermiques de la période de maturation du raisin dans le système de classification multicritères des climats viticoles mondiaux. In *Proceedings of the 11th Meeting of the Study Group for Vine Training Systems* (pp. 10–13). Palermo, Italy.

Tonietto, J., & Carbonneau, A. (2004). A multicriteria climatic classification system for grape-growing regions worldwide. *Agricultural and Forest Meteorology, 124*(1–2), 81–97. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2003.06.001

Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate, 23*(7), 1696–1718. https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1

Zhang, X., Alexander, L., Hegerl, G. C., Jones, P. D., Tank, A. K., Peterson, T. C., Trewin, B., & Zwiers, F. W. (2011). Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, 2*(6), 851–870.

ESCENARIOS PASADOS Y FUTUROS DE LA DISPONIBILIDAD DE FRÍO Y CALOR PARA LOS FRUTALES Y LA OCURRENCIA DE HELADAS EN ARAGÓN

Eduardo PÉREZ SOSA[1], Roberto SERRANO NOTIVOLI[1],
Miguel Ángel SAZ SÁNCHEZ[1], María Luz HERNÁNDEZ NAVARRO[2]

[1]Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio. Clima, Agua, Cambio Global y Sistemas Naturales. Instituto Universitario de Investigación en Ciencias Ambientales de Aragón.
[2]Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio. Grupo de Estudios de Ordenación del Territorio. Instituto Universitario de Investigación en Ciencias Ambientales de Aragón

eduardo.perez@unizar.es, roberto.serrano@unizar.es,
masaz@unizar.es, mlhernan@unizar.es,

RESUMEN

En un contexto de calentamiento, se vaticinan deficiencias en la producción y rendimiento de frutales por la falta de frío. El objetivo de nuestro estudio consistió en analizar las variaciones espacio-temporales de las condiciones térmicas para los frutales y la amenaza de heladas al noreste de España. Utilizamos una base de datos de temperaturas diarias de 70 años a resolución espacial de 1 km2 (SiCLIMA) y proyecciones de temperatura diarias de un conjunto de 18 modelos climáticos regionales RCP4.5 y RCP8.5 para los períodos de mediados (2041-2070) y finales de siglo (2071-2100) (EURO-CORDEX), reducidos a partir de modelos climáticos globales y corrección de sesgo. Se calcularon las porciones frío (Modelo Dinámico) de noviembre a febrero y el forzamiento (Grados Horas de Crecimiento) de febrero a marzo, así como la probabilidad de ocurrencia de heladas tardías después del 1 de marzo para cada uno de los escenarios. Los resultados indican que el enfriamiento invernal se mantiene dentro de rangos compatibles con la producción de fruta en todos los escenarios, con persistentes contrastes espaciales entre los sectores occidental y oriental. Por el contrario, la acumulación de calor primaveral muestra un aumento significativo y espacialmente coherente, especialmente en las zonas de baja altitud y orientales, lo que indica una creciente influencia de las temperaturas primaverales en la dinámica fenológica. Aunque los escenarios futuros prevén una reducción sustancial de la probabilidad de que se produzcan heladas después de principios de marzo, el aumento de la acumulación de calor puede adelantar el desarrollo fenológico, desplazando potencialmente la exposición a las heladas a períodos más tempranos a finales del invierno.

Palabras clave: porciones frío, grados horas de crecimiento, heladas tardías, cambio climático, frutales

ABSTRACT

In a warming context, deficiencies in the production and performance of fruit trees are expected due to insufficient winter chill. The objective of our study was to analyze the spatiotemporal variations in thermal conditions for fruit trees and the risk of frost in northeastern Spain. We used a database of daily temperatures spanning 70 years at a spatial resolution of 1 km² (SiCLIMA), along with daily temperature projections from an ensemble of 18 regional climate models under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios for the mid-century (2041–2070) and end-of-century (2071–2100) periods (EURO-CORDEX), derived from global climate models and bias-corrected. Chill portions (Dynamic Model) were calculated from November to February, and forcing (Growing Degree Hours) from February to March, as well as the probability of late frost occurrence after March 1 for each scenario. The results indicate that effective winter chill remains within ranges compatible with fruit production across all scenarios, with persistent spatial contrasts between western and eastern sectors. In contrast, spring heat accumulation shows a significant and spatially consistent increase, especially in low-altitude and eastern areas, indicating a growing influence of spring temperatures on phenological dynamics. Although future scenarios project a substantial reduction in the probability of frost occurrence after early March, increased heat accumulation may advance phenological development, potentially shifting frost exposure to earlier periods in late winter.

Key words: chill portions, growing degree hours, spring frost probability occurrence, climate change, fruit trees

INTRODUCCIÓN

La ruptura de la dormancia en los frutales requiere el cumplimiento de los requisitos de frío específicos de cada especie y cultivar, después de lo cual la acumulación de calor rige la reanudación del crecimiento vegetativo y el desarrollo reproductivo (Lloret et al., 2018).

Debido al cambio climático, se espera que el aumento de las temperaturas a finales del invierno y principios de la primavera adelante el desarrollo fenológico en muchas especies leñosas (Ma et al., 2019). Este adelanto fenológico puede aumentar la exposición de las etapas de desarrollo sensibles a las heladas tardías de la primavera, particularmente en especies con alta sensibilidad fenológica, como los árboles frutales caducifolios de clima templado.

El objetivo consistió en analizar la variabilidad espaciotemporal del frío invernal, la acumulación de calor primaveral y la probabilidad de heladas primaverales a escala regional en Aragón bajo escenarios históricos y de cambio climático.

METODOLOGÍA

2.1. Escenarios climáticos

A partir de los datos de temperatura en rejilla de SiCLIMA (Serrano-Notivoli et al., 2024) se construyeron cinco períodos superpuestos de 30 años (1951-1980, 1961-1990, 1971-2000, 1981-2010 y 1991-2020), desplazando cada ventana una década hacia adelante. Las proyecciones de temperatura máxima y mínima diarias se obtuvieron de 18 modelos climáticos para un período de referencia histórico (1971-2000), bajo el escenario de emisiones intermedias RCP4.5 y el escenario de altas emisiones RCP8.5 para los períodos 2041-2070 y 2071-2100 (5 km2). Los datos fueron ajustados a la resolución espacial de SiCLIMA (1 km2) mediante una interpolación bilineal y un ajuste de sesgo por mapeo de cuantiles empíricos (EQM), con el fin de garantizar la coherencia estadística entre las proyecciones interpoladas y las observaciones de SiCLIMA. Este procedimiento se calibró durante el período de referencia 1971-2000 y posteriormente se aplicó a las proyecciones climáticas futuras.

2.2. Modelo dinámico, grados horas de crecimiento y probabilidad de heladas tardías

El modelo dinámico se basa en la suposición de que el frío invernal se acumula en dos etapas: 1) se forma un producto intermedio de frío a partir de bajas temperaturas, que puede ser destruido por altas temperaturas; 2) cuando este producto intermedio alcanza una cierta acumulación, se transforma permanentemente en una porción de frío (CP, por sus siglas en inglés) (Fishman et al., 1987a, 1987b). Mientras que la acumulación de calor (GDH, por sus siglas en inglés) para la floración representa la integral térmica requerida para la floración después de la ruptura de la dormancia (Anderson et al., 1986). Los cálculos por pixel para ambos modelos se efectuaron con el paquete de R chillR (Luedeling et al., 2024). Por último, debido a la falta de fechas precisas de floración, la probabilidad de ocurrencia de heladas primaverales se definió como la probabilidad de que se produzcan temperaturas mínimas iguales o inferiores a 0 °C después del 1 de marzo (lo hemos denominado como SFPO, por sus siglas en inglés), periodo durante el cual la mayoría de las especies frutales de la región suelen estar en flor. En lugar de asumir una distribución teórica, las fechas de ocurrencia de heladas se analizaron utilizando la función de distribución acumulativa empírica (CDF).

RESULTADOS

3.1. Patrones espaciales de CP, GDH y SFPO promedio bajo escenarios climáticos en Aragón

Durante el período histórico, los patrones espaciales de CP fueron consistentes, con gran parte de la región manteniendo valores superiores a 70 CP. En los escenarios de emisiones medias y altas a medio y largo plazo, se observó un aumento de CP, excepto en la zona central, donde los valores parecen disminuir en el escenario más

extremo (Figura 1a).

RESULTADOS

3.1. Patrones espaciales de CP, GDH y SFPO promedio bajo escenarios climáticos en Aragón

Durante el período histórico, los patrones espaciales de CP fueron consistentes, con gran parte de la región manteniendo valores superiores a 70 CP. En los escenarios de emisiones medias y altas a medio y largo plazo, se observó un aumento de CP, excepto en la zona central, donde los valores parecen disminuir en el escenario más extremo (Figura 1a).

La acumulación de calor durante febrero y marzo mostró un marcado gradiente altitudinal, con valores de GDH más altos en áreas menos elevadas y menor acumulación en altitudes más elevadas (Figura 1b). Si bien este patrón espacial se mantuvo constante en todos los escenarios, la magnitud del forzamiento térmico aumentó con el tiempo. En los escenarios de cambio climático, se observó un calentamiento pronunciado, particularmente en la región central de baja altitud, que se volvió notablemente más cálida que el territorio circundante. Por el contrario, el descenso de la SFPO en la mayor parte del territorio (excepto en las zonas de gran altitud) fue muy notorio en los escenarios de cambio climático futuros, alcanzando niveles considerablemente bajos en el escenario más extremo (Figura 1c).

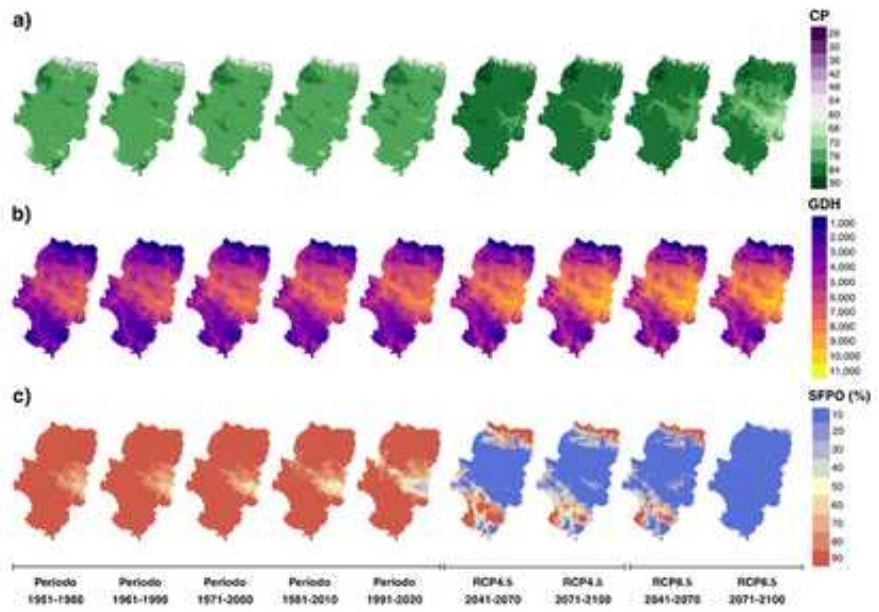


Figura 1. Patrones espaciales de los valores medios de CP (a), GDH (b) y SFPO (c) según los periodos históricos y los escenarios de cambio climático en Aragón.

3.2. Anomalías de CP, GDH y SFPO bajo escenarios climáticos en Aragón

Durante el período histórico, las variaciones en CP fueron moderadas. Las discrepancias más significativas con respecto al período de referencia (1971-2000) se concentraron en los límites norte y sur del territorio. En los períodos 1951-1980, 1961-1990 y especialmente 1981-2010, prevalecieron anomalías negativas en aproximadamente el 70% del territorio. Bajo los escenarios climáticos RCP4.5, se proyectó un aumento generalizado en la eficiencia de enfriamiento (anomalía media de +5,46 CP para 2041-2071), con mayor disponibilidad en zonas de mayor altitud y una disminución relativa en tierras bajas, principalmente en el sector oriental.

Sin embargo, bajo el escenario RCP8.5 (2071-2100), se observó una transición crítica: aunque la anomalía media regional sigue siendo positiva (+2,13), la desviación estándar espacial aumenta a 6,41. Esto refleja áreas específicas donde CP disminuye drásticamente (sector centro-oriental), interrumpiendo las tendencias de períodos anteriores (Figura 2ab).

Las diferencias y las anomalías estandarizadas del forzamiento evidenciaron un aumento en todo el territorio aragonés. Mientras que el período 1951-1980 mostró una anomalía negativa media de -449,2 GDH, las proyecciones futuras revelaron una aceleración extrema, particularmente en la parte oriental. Para finales de siglo (2071-2100), el escenario RCP8.5 proyectó aumentos medios de +1049,3 GDH. En términos de anomalías estandarizadas, este incremento superó las dos desviaciones estándar, consolidando un patrón de calentamiento espacial en toda la región (Figura 2cd).

El indicador SFPO mostró una notable estabilidad histórica con respecto a la línea base, pero experimentó un cambio drástico en las proyecciones futuras. Bajo los escenarios RCP4.5, los valores de SFPO disminuyeron sustancialmente en la mayor parte del territorio, excepto en las zonas de gran altitud. Esta tendencia alcanzó su punto máximo en el escenario RCP8.5 para el período 2071-2100, donde la probabilidad de heladas después del 1 de marzo bajó a una mediana regional del 13,0 %. Espacialmente, esto representó una reducción de hasta el 99,9 % en la probabilidad de heladas tardías en gran parte de la superficie regional en comparación con el período 1971-2000 (Figura 2e).

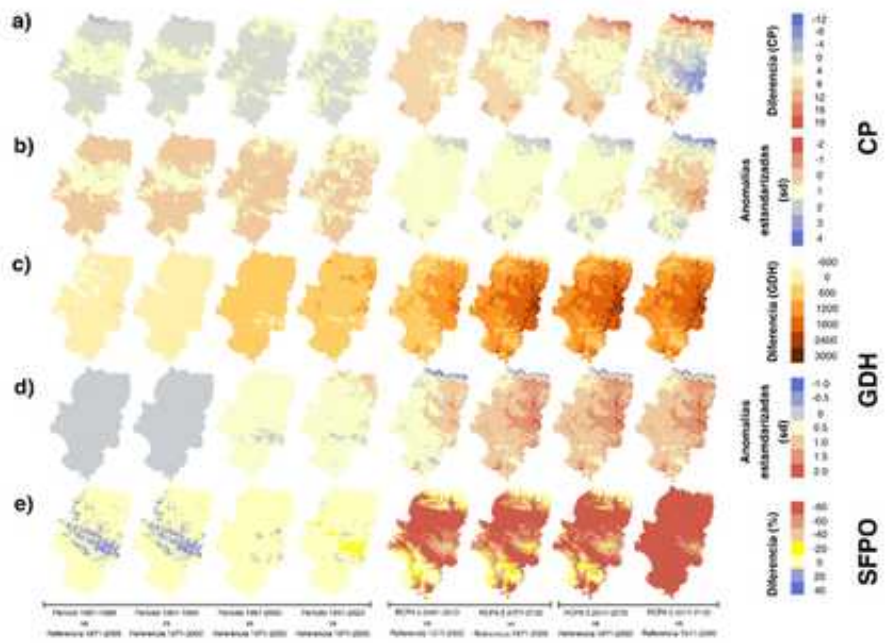


Figura 2. Patrones de diferencias y anomalías estandarizadas de CP (ab), GDH (cd) y SFPO (e) según periodos históricos y escenarios de cambio climático en Aragón.

DISCUSIÓN

En general, las condiciones de frío invernal en Aragón se mantuvieron dentro de los rangos amplios de requerimientos de frío, incluso bajo escenarios climáticos futuros, a escala regional, no se detectó una pérdida generalizada de frío invernal. Este comportamiento fue consistente con estudios recientes que muestran que, en algunas regiones mediterráneas y templadas, el calentamiento no necesariamente conduce a una reducción sistemática en el frío invernal acumulado, particularmente en entornos donde los inviernos siguen siendo suficientemente fríos (Fraga & Santos, 2021; Freitas et al., 2024).

A diferencia del comportamiento relativamente estable del frío invernal, la acumulación de calor primaveral mostró un incremento fuerte y espacialmente coherente en Aragón bajo los escenarios climáticos futuros. Este patrón refuerza la evidencia previa que indica que el calentamiento durante la fase de forzamiento puede ejercer una mayor influencia en la cronología fenológica que los cambios moderados en el frío invernal, particularmente en regiones donde el frío no es un factor limitante (Fraga y Santos, 2021; Freitas et al., 2024).

Si bien los escenarios futuros indican una reducción sustancial en la probabilidad de heladas después del 1 de marzo, esta disminución no se traduce necesariamente en

la probabilidad de heladas después del 1 de marzo, esta disminución no se traduce necesariamente en una reducción proporcional del riesgo para la producción. El aumento en la acumulación de calor primaveral observado en toda la región probablemente adelante el desarrollo fenológico, lo que podría desplazar etapas de desarrollo sensibles a fechas más tempranas y mantener la exposición a heladas poco frecuentes, pero potencialmente dañinas. Este comportamiento es coherente con los marcos conceptuales que sugieren que el riesgo de heladas puede permanecer sin cambios o incluso aumentar cuando el avance fenológico supera la extensión de los períodos libres de heladas (Augspurger, 2013; Ma et al., 2019).

Es importante resaltar que los resultados deben interpretarse con cautela debido a que existen diversas fuentes de incertidumbre, por ejemplo, en la generación de los datos climáticos, los modelos de interpolación, reducción de escala y corrección de sesgo o la ausencia de observaciones fenológicas precisas.

REFERENCIAS

Augspurger CK (2013) Reconstructing patterns of temperature, phenology, and frost damage over 124 years: Spring damage risk is increasing. Ecology 94:41-50. https://doi.org/10.1890/12-0200.1

Anderson JL, Richardson EA, Kesner CD (1986) Validation of chill unit and flower bud phenology models for 'Montmorency' sour cherry. Acta Hortic 184:71-78. doi:10.17660/ActaHortic.1986.184.7

Fishman S, Erez A, Couvillon GA (1987a) The temperature dependence of dormancy breaking in plants: Computer simulation of processes studied under controlled temperatures. Journal of Theoretical Biology 126(3). https://doi.org/10.1016/S0022-5193(87)80237-0

Fishman S, Erez A, Couvillon GA (1987b) The temperature dependence of dormancy breaking in plants: Mathematical analysis of a two-step model involving a cooperative transition. Journal of Theoretical Biology 124(4). https://doi.org/10.1016/S0022-5193(87)80221-7

Fraga H, Santos JA (2021) Assessment of Climate Change Impacts on Chilling and Forcing for the Main Fresh Fruit Regions in Portugal. Frontiers in Plant Science 12. https://doi.org/10.3389/fpls.2021.689121

Freitas TR, Santos JA, Silva AP, Fraga H (2023) Evaluation of historical and future thermal conditions for almond trees in north-eastern Portugal. Climatic Change 176:89 https://doi.org/10.1007/s10584-023-03569-2

Lloret A, Badenes M, Ríos G (2018) Modulation of dormancy and growth responses in reproductive buds of temperate trees. Frontiers in Plant Science 9:1368 https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01368

Luedeling E, Caspersen L, Fernandez E (2024) chillR: Statistical Methods for Phenology Analysis in Temperate Fruit Trees.

Ma Q, Huang JG, Hänninen H, Berninger F (2019) Divergent trends in the risk of spring frost damage to trees in Europe with recent warming. Glob Change Biol 25:351– 360. https://doi.org/10.1111/gcb.14479

Serrano-Notivoli R, Saz MA, Longares LA, de Luis M. (2024). SiCLIMA: High-resolution hydroclimate and temperature dataset for Aragón (Northeast Spain). *Data in Brief*, 56. https://doi.org/10.1016/j.dib.2024.110876

GOBERNANZA DE LOS SISTEMAS DE ALERTA TEMPRANA EN RISARALDA, COLOMBIA: BRECHAS ENTRE PLANIFICACIÓN, INVERSIÓN Y ARTICULACIÓN INSTITUCIONAL

Alexander GALINDO LÓPEZ[1]

Profesor catedrático de la Universidad Tecnología de Pereira - UTP, jefe de control interno de gestión del la Corporación Autónoma Regional de Risaralda - CARDER, Candidato a Doctor en Gestión Integral del Riesgo de la Escuela nacional de Protección Civil – sede Chiapas, México - ENAPROC.

agalindo@utp.edu.co

RESUMEN

Los riesgos asociados al cambio climático han incrementado la frecuencia e intensidad de eventos hidrometeorológicos extremos, especialmente en territorios altamente expuestos donde convergen condiciones de vulnerabilidad institucional y socioeconómica. En este contexto, los sistemas de alerta temprana (SAT) se constituyen en herramientas fundamentales para la gestión del riesgo; sin embargo, su efectividad depende en gran medida de la gobernanza del riesgo y de la capacidad de articulación entre actores en diferentes niveles. El presente estudio analiza la gobernanza de los sistemas de alerta temprana en el departamento de Risaralda (Colombia), mediante un enfoque mixto que integra análisis normativo, identificación de actores y la aplicación de una matriz de evaluación compuesta por 9 variables y 19 indicadores. La matriz fue validada a través de un panel de 12 expertos, quienes ponderaron la importancia de las variables y evaluaron el desempeño del sistema en el territorio. Los resultados evidencian una brecha significativa entre la relevancia de la gobernanza del riesgo y su implementación efectiva, identificándose debilidades en la coordinación multinivel, vacíos en la definición operativa de roles y limitaciones en la sostenibilidad institucional. En contraste, los componentes tecnológicos presentan un mayor nivel de desarrollo relativo.

Se concluye que las principales limitaciones de los sistemas de alerta temprana no son de carácter tecnológico, sino de gobernanza, lo que resalta la necesidad de fortalecer los mecanismos de coordinación multinivel y de integrar de manera efectiva estos sistemas en las estrategias de gestión del riesgo frente al cambio climático.

Palabras clave: gobernanza del riesgo, sistemas de alerta temprana, cambio climático, gestión del riesgo, coordinación multinivel.

ABSTRACT

Climate change has intensified the frequency and severity of hydrometeorological extreme events, particularly in highly exposed territories where institutional and socioeconomic vulnerabilities converge. In this context, Early Warning Systems (EWS) are key tools for risk management; however, their effectiveness largely depends on risk governance and the capacity to articulate actors across different levels. This study analyses the governance of Early Warning Systems in the department of Risaralda (Colombia) using a mixed-methods approach that integrates normative analysis, stakeholder identification, and the application of an evaluation matrix composed of 9 variables and 19 indicators. The matrix was validated through a panel of 12 experts, who weighted the importance of the variables and assessed the system's performance in the territory. The results reveal a significant gap between the relevance of risk governance and its effective implementation, identifying critical weaknesses in multilevel coordination, operational definition of roles, and institutional sustainability. In contrast, technological components show a relatively higher level of development.

The study concludes that the main limitations of Early Warning Systems are not technological but governance-related, highlighting the need to strengthen multilevel coordination mechanisms and to effectively integrate these systems into broader risk management strategies in the context of climate change.

Keywords: Risk governance; Early warning systems; Climate change; Risk management; Multilevel coordination.

INTRODUCCIÓN

El aumento en la frecuencia e intensidad de eventos hidrometeorológicos, asociado al cambio climático, ha posicionado a los Sistemas de Alerta Temprana (SAT) como instrumentos clave para la reducción del riesgo de desastres y la adaptación territorial. Marcos internacionales como el Marco de Sendai, los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 11 y 13) y el Acuerdo de París han enfatizado la necesidad de fortalecer estos sistemas como parte de estrategias integrales de resiliencia.

En Colombia, si bien la Ley 1523 de 2012 establece la integración de la gestión del riesgo en la planificación territorial, persisten brechas entre el diseño normativo y su implementación efectiva. Estas limitaciones se manifiestan especialmente en la articulación institucional y la coordinación multinivel. En este contexto, el presente estudio analiza la gobernanza de los SAT en Risaralda, con el propósito de evaluar si su desarrollo responde a una política pública estructurada o a dinámicas fragmentadas de gestión del riesgo.

MARCO NORMATIVO Y CONCEPTUAL

El análisis de los Sistemas de Alerta Temprana (SAT) se fundamenta en un marco normativo multiescalar y en un enfoque conceptual que integra la gestión del riesgo, la gobernanza y la planificación territorial. A nivel internacional, el Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres reconoce la importancia de fortalecer estos sistemas para reducir pérdidas y aumentar la resiliencia (UNDRR, 2015). De manera complementaria, los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 11 y 13) promueven la resiliencia urbana y la acción climática, mientras que el Acuerdo de París enfatiza la adaptación y el fortalecimiento institucional frente al cambio climático (Naciones Unidas, 2015; UNFCCC, 2015). En el ámbito nacional, la Constitución Política de Colombia y la Ley 1523 de 2012 establecen la gestión del riesgo como un proceso obligatorio y transversal. Asimismo, el Plan Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres define lineamientos para el monitoreo, la generación de alertas y la articulación institucional, consolidando el marco de actuación de los SAT en el país (Gobierno de Colombia, 2016; 2022; 2024). Desde una perspectiva conceptual, la gobernanza del riesgo se entiende como el conjunto de procesos, estructuras e interacciones mediante los cuales múltiples actores participan en la toma de decisiones frente a problemáticas complejas (Djalante et al., 2011). Este enfoque implica una distribución del poder en sistemas multinivel, donde la coordinación y la cooperación son determinantes para la efectividad de la acción pública. En este sentido, el riesgo se concibe como una construcción social derivada de la interacción entre amenaza, vulnerabilidad y exposición (Narváez et al., 2009). El enfoque de gobernanza del riesgo amplía esta visión al incorporar dimensiones sociales, políticas e institucionales, reconociendo que la gestión del riesgo requiere la integración de conocimiento técnico, experiencia social y deliberación pública (IRGC, 2017; Klinke & Renn, 2019). Esto implica una redistribución de funciones entre actores estatales y no estatales, donde la participación de la sociedad civil, el sector privado y la academia resulta fundamental, especialmente en escenarios de cambio climático que demandan respuestas adaptativas (Sandoval et al., 2022). En este contexto, los SAT deben entenderse como sistemas sociotécnicos, cuya efectividad depende de la interacción entre componentes tecnológicos, institucionales y sociales (Rivera Berrío, 2009). En consecuencia, sus limitaciones no responden exclusivamente a aspectos técnicos, sino a debilidades en la articulación institucional, la coordinación entre actores y la participación comunitaria. Bajo esta perspectiva, la gobernanza de los SAT se configura como el conjunto de arreglos e interacciones que permiten el uso efectivo de la información para la reducción del riesgo de desastres, particularmente en territorios con alta exposición climática.

METODOLOGÍA

La investigación adopta un enfoque metodológico mixto con alcance analítico-comparativo, orientado a examinar la relación entre el marco normativo, la

planificación territorial y la implementación de los Sistemas de Alerta Temprana (SAT) en el departamento de Risaralda. El proceso se desarrolló en tres fases:

- **Fase cualitativa:** Se analizaron los instrumentos de planificación territorial de los 14 municipios del departamento, incluyendo los Planes de Desarrollo (PD) y los Planes de Gestión del Riesgo de Desastres (PGRD), con el fin de identificar el nivel de incorporación de los SAT y su articulación con los procesos de gestión del riesgo.
- **Fase cuantitativa:** Se realizó un análisis de la inversión pública asociada a la gestión del riesgo y a los SAT durante el periodo 2013–2025, permitiendo identificar tendencias de inversión, niveles de concentración de recursos y grados de priorización institucional.
- **Evaluación y validación:** Se construyó una matriz de evaluación compuesta por 9 dimensiones de gobernanza y 19 indicadores, validada mediante un panel de 12 expertos en gestión del riesgo de desastres. La ponderación de las dimensiones se realizó mediante una escala de valoración de 1 a 100, en la cual los expertos asignaron un peso relativo de acuerdo con el nivel de importancia atribuido al funcionamiento de los SAT. Posteriormente, los expertos evaluaron los 19 indicadores asociados a cada dimensión, permitiendo estimar un índice global de gobernanza del sistema mediante promedio ponderado.

RESULTADOS

Análisis jurídico conceptual desde la perspectiva departamental y municipal.

El análisis comparado de los instrumentos de planificación territorial —Planes de Desarrollo (PD), Planes de Gestión del Riesgo de Desastres (PGRD) y el Plan de Acción de la CARDER— evidencia una brecha entre la dimensión político-programática y la técnico-operativa. Aunque la gestión del riesgo está presente en todos los Planes de Desarrollo (CR=1), la inclusión explícita de los Sistemas de Alerta Temprana (SAT) y su priorización programática son limitadas. En contraste, los PGRD presentan mayor consistencia técnica, incorporando los SAT tanto a nivel conceptual como operativo. El índice de cumplimiento legal (CL) identifica tres niveles de desempeño: un nivel alto (CL=5) en Mistrató, Pereira y Dosquebradas; un nivel intermedio (CL=4) con avances parciales; y un nivel bajo (CL≤3) en municipios donde los SAT no han sido priorizados. Casos como Belén de Umbría (CL=1) evidencian omisiones estructurales, mientras que la Gobernación (CL=4) refleja debilidades en la articulación multinivel. En conjunto, los resultados indican que la principal limitación no es técnica, sino de articulación entre planificación, programación presupuestal y gobernanza, lo que impide la consolidación de los SAT como política pública territorial.



Figura 1. Inclusión de los SAT en los PD y PGRD

Inversión

El análisis de la inversión en los SAT (los valores aquí expresados están en pesos colombianos) evidencia una alta concentración de recursos en un número reducido de actores, principalmente la Gobernación, la CARDER, el municipio de Pereira y empresas públicas. Este patrón revela una estructura de financiamiento centralizada, que genera dependencia institucional y limita la sostenibilidad del sistema. Asimismo, reduce la apropiación territorial de los SAT, al restringir la participación de otros actores locales en su financiación y operación. Desde una perspectiva de gobernanza del riesgo, estos resultados sugieren que el principal desafío no es la disponibilidad de recursos, sino su distribución y articulación, lo que afecta directamente la capacidad de respuesta del sistema frente a eventos asociados al cambio climático.



Figura 2. Distribución de la inversión en SAT

Validación de la gobernanza mediante panel de expertos

La aplicación del modelo de evaluación de gobernanza, validado mediante un panel de 12 expertos, permitió estimar un índice global ponderado de 3,00, ubicando al sistema en un nivel de gobernanza moderada. Este resultado indica que el Sistema de Alerta Temprana (SAT) presenta un funcionamiento operativo, pero con vacíos estructurales que limitan su consolidación como política pública. El análisis por dimensiones evidencia un comportamiento diferenciado. Las mayores puntuaciones corresponden a la coordinación policéntrica (4,0), el marco institucional (3,9) y los sistemas de monitoreo (3,8), lo que refleja capacidades técnicas e institucionales consolidadas. En contraste, la participación social (2,9), las pruebas y mejora continua (3,0) y los enlaces críticos (3,1) presentan los niveles más bajos, evidenciando debilidades en la apropiación social y la articulación operativa. Asimismo, el puntaje ponderado muestra que la coordinación policéntrica (0,59) y el financiamiento (0,43) tienen una alta incidencia en el desempeño global, lo que confirma la dependencia del sistema de estos factores. En conjunto, los resultados evidencian un desbalance estructural, donde las capacidades técnicas superan el desarrollo de los componentes sociales e institucionales, indicando que las principales limitaciones del SAT son de gobernanza y no tecnológicas.



Figura 3. Evaluación de Gobernanza del SAT de Risaralda

DISCUSIÓN

Los resultados evidencian una tensión estructural entre el desarrollo técnico de los Sistemas de Alerta Temprana (SAT) y la consolidación de su gobernanza, confirmando que su efectividad no depende exclusivamente de la tecnología, sino de

su integración en arreglos institucionales, sociales y políticos. En primer lugar, se observa una incorporación generalizada de la gestión del riesgo en los instrumentos de planificación territorial, pero una débil institucionalización de los SAT como política pública. Esto refleja una brecha entre la gobernanza formal y la gobernanza real, donde la existencia de marcos normativos no garantiza su implementación efectiva (Hilhorst et al., 2020). En consecuencia, los SAT en Risaralda responden más a dinámicas fragmentadas que a una estrategia integral de gobernanza del riesgo.

En segundo lugar, el índice global de gobernanza (3,00) evidencia un sistema funcional, pero con vacíos críticos en participación social, articulación operativa y mejora continua. Este resultado reafirma el carácter sociotécnico de los SAT, cuya efectividad depende de la interacción entre conocimiento del riesgo, monitoreo, comunicación y capacidad de respuesta (UNDRR & WMO, 2024; García, 2012). Asimismo, el panel de expertos confirma un desbalance entre la importancia de las dimensiones de gobernanza y su nivel de implementación, evidenciando que las capacidades técnicas no se traducen en resultados efectivos debido a debilidades en la coordinación multinivel y la definición de responsabilidades (Sarker et al., 2020).

Adicionalmente, la concentración de la inversión en pocos actores refleja una gobernanza financiera centralizada, que limita la sostenibilidad del sistema y su apropiación territorial, lo cual coincide con barreras identificadas en contextos de países en desarrollo.

Finalmente, los resultados indican que los SAT en Risaralda se encuentran en una fase de transición, donde los avances técnicos no han sido acompañados por un fortalecimiento equivalente de la gobernanza. Esto confirma que la evolución de estos sistemas es fundamentalmente institucional y social, más que tecnológica (Aguilar, 2010; Hufty, 2009).

CONCLUSIONES

Los resultados evidencian una brecha estructural entre la planificación territorial y la implementación operativa de los Sistemas de Alerta Temprana (SAT). Aunque la gestión del riesgo está incorporada en los instrumentos de planificación, los SAT no han sido priorizados programáticamente, lo que limita su consolidación como política pública y refleja una desconexión entre el diseño institucional y su ejecución en el territorio. Asimismo, la principal limitación de los SAT no radica en las capacidades técnicas, sino en la débil articulación institucional. Aunque existen herramientas y lineamientos técnicos suficientes, la falta de integración entre los Planes de Gestión del Riesgo y los Planes de Desarrollo restringe su operatividad, confirmando que su efectividad depende de la coordinación multinivel.

Por otra parte, la inversión en SAT presenta una alta concentración en pocos actores, lo que genera dependencia y limita su sostenibilidad territorial. Esta situación evidencia debilidades en la gobernanza del riesgo, particularmente en la distribución de responsabilidades y capacidades entre niveles de gobierno.

En este sentido, se recomienda fortalecer mecanismos de articulación interinstitucional y coordinación multinivel, así como incorporar líneas programáticas y esquemas de financiamiento específicos para los SAT dentro de los instrumentos de planificación territorial. De igual forma, resulta necesario promover procesos de participación comunitaria y evaluación periódica del sistema, con el fin de consolidar los SAT como herramientas efectivas de adaptación al cambio climático y reducción del riesgo de desastres.

Finalmente, se concluye que la gobernanza del riesgo es el factor determinante en la efectividad de los SAT, especialmente en contextos de cambio climático. La articulación entre actores, niveles institucionales e instrumentos de planificación define su desempeño como herramienta de adaptación en territorios altamente expuestos.

REFERENCIAS

Aguilar Villanueva, L. F. (2010). *Gobernanza: El nuevo proceso de gobernar*. Fundación Friedrich Naumann para la Libertad.

Congreso de Colombia. (2012). *Ley 1523 de 2012 por la cual se adopta la Política Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (SNGRD).* Diario Oficial No. 48.411.

Djalante, R., Holley, C., & Thomalla, F. (2011). Adaptive governance and managing resilience to natural hazards. *International Journal of Disaster Risk Science, 2*(4), 1–14. https://doi.org/10.1007/s13753-011-0015-6

García, C. (2012). Designing and implementing more effective integrated early warning systems in mountain areas: A case study from Northern Italy. *Journal of Alpine Research / Revue de Géographie Alpine, 100*(1). https://doi.org/10.4000/rga.1679

Hilhorst, D., Boersma, K., & Raju, E. (2020). Research on politics of disaster risk governance: Where are we headed? *Politics and Governance, 8*(4), 214–219. https://doi.org/10.17645/pag.v8i4.3843

Hufty, M. (2009). Una propuesta para concretizar el concepto de gobernanza: El Marco Analítico de la Gobernanza. En H. Mazurek (Ed.), *Gobernabilidad y gobernanza de los territorios de América Latina* (pp. 77–100). IFEA-CESU-IRD.

International Risk Governance Council. (2017). *Introduction to the IRGC risk governance framework*. EPFL International Risk Governance Center. https://irgc.org

Klinke, A., & Renn, O. (2019). The coming of age of risk governance. *Risk Analysis, 39*(5), 1043–1048. https://doi.org/10.1111/risa.13383

Naciones Unidas. (2015). *Transformar nuestro mundo: La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. https://sdgs.un.org

Narváez, L., Lavell, A., & Pérez Ortega, G. (2009). *La gestión del riesgo de desastres: Un enfoque basado en procesos*. Comunidad Andina.

Rivera Berrío, J. G. (2009). Un modelo de gobernanza para gestionar el riesgo. *Trilogía Ciencia Tecnología Sociedad, 1*(1), 95–112. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=534366885008

Sandoval, V., Voss, M., & Irazábal, C. (2022). Disaster governance and collective intelligences in Latin American cities. *Revista de Estudios Latinoamericanos sobre Reducción del Riesgo de Desastres, 6*(2), 115–124.

Sarker, M. N. I., Peng, Y., Yiran, C., & Shouse, R. C. (2020). Disaster resilience through big data: Way to environmental sustainability. *International Journal of Disaster Risk Reduction, 51*, 101769. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2020.101769

United Nations Framework Convention on Climate Change. (2015). *Paris Agreement*. https://unfccc.int

United Nations Office for Disaster Risk Reduction. (2015). *Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015–2030*. https://www.undrr.org

United Nations Office for Disaster Risk Reduction, & World Meteorological Organization. (2024). *Global status of multi-hazard early warning systems 2024*. https://www.undrr.org

ADAPTACIONES URBANAS ANTE EL EXCESO DE CALOR. LA DISMINUCIÓN DE LA TEMPERATURA BAJO UN TOLDO PILOTO EN BARCELONA

Javier MARTÍN-VIDE[1], María del Carmen MORENO-GARCÍA[2]

[1] *Universitat de Barcelona y Observatorio Fabra (RACAB)*
[2] *Universitat de Barcelona*

jmartinvide@ub.edu, mcmoreno@ub.edu

RESUMEN

El exceso de calor constituye el mayor riesgo del cambio climático en buena parte de España. En las ciudades el problema se agrava por el elevado porcentaje de la población que vive o trabaja en ellas y el plus térmico de sus islas de calor. Una relación de los procedimientos y actuaciones de adaptación al calor incluye: los refugios climáticos; el reverdecimiento con el aumento de la superficie de parques y jardines, con los ejes verdes y las supermanzanas, y con las cubiertas y los muros verdes; las cubiertas frescas y las superficies blancas; los toldos y las estructuras que proveen sombra; las pérgolas; el agua nebulizada y las láminas de agua; y la naturalización del suelo.

La presente aportación tiene por objeto la determinación de la temperatura del suelo a la sombra de un toldo piloto instalado por el Ayuntamiento de Barcelona y fuera de ella, y su relación entre sí y con la temperatura del aire, la velocidad del viento y el estado del cielo. Se realizaron medidas instrumentales, con un termómetro de infrarrojos, durante 34 jornadas, a la hora del registro de la temperatura máxima del aire, desde la primera quincena de mayo hasta la última semana de julio de 2025, que incluyó la ola de calor de finales de junio y principios de julio. La diferencia media entre la temperatura de la superficie bajo la estructura de sombra y la de la superficie adyacente sin sombra fue bastante constante: 18 ºC, fruto de los valores térmicos promedio de 55 ºC del suelo al sol y 37 ºC del suelo a la sombra.

La correlación lineal entre ambas es muy elevada, así como con la temperatura del aire y la del asfalto de una calle próxima. El tipo de toldo y otras características físicas son determinantes en el grado de atenuación de la radiación solar directa.

Palabras clave: adaptación, Barcelona, exceso de calor, temperatura, toldo.

ABSTRACT

Excessive heat represents the greatest risk posed by climate change in much of Spain. In cities, the problem is exacerbated by the high percentage of the population living or working in them, as well as the thermal addition caused by urban heat islands. A list of heat adaptation procedures and actions includes: climate shelters; urban greening through the expansion of parks and gardens, green axes, and "superblocks" (supermanzanas); green roofs and walls; cool roofs and white surfaces; awnings and shade-providing structures; pergolas; misting systems and water features; and soil naturalization. The objective of this study is to determine the ground temperature both under the shade of a pilot awning installed by the Barcelona City Council and outside of it, as well as its relationship with air temperature, wind speed, and sky conditions. Instrumental measurements were taken using an infrared thermometer over 34 days. Data was collected during the time of maximum recorded air temperature from the first half of May to the last week of July 2025, a period that included the heatwave of late June and early July. The average difference between the surface temperature under the shade structure and the adjacent unshaded surface remained fairly constant: 18 °C. This resulted from average thermal values of 55 °C for ground in the sun and 37 °C for ground in the shade. The linear correlation between both measurements is very high, as is the correlation with air temperature and the asphalt temperature of a nearby street. The type of awning and ther physical characteristics are decisive factors in the degree of direct solar radiation attenuation.

Key words: adaptation, Barcelona, excessive heat, temperature, awning.

INTRODUCCIÓN

El principal riesgo al que se enfrentan las ciudades mediterráneas en el contexto del cambio climático es el exceso de calor en verano, que afecta gravemente a las personas mayores con enfermedades crónicas, aumentando su morbilidad y mortalidad, sobre todo si viven en condiciones de pobreza energética (Martín-Vide y Moreno-García, 2024). Barcelona está desplegando un conjunto de medidas e infraestructuras para rebajar el impacto del calor, entre las que se encuentra la instalación de toldos y estructuras que dan sombra.

El calentamiento global se agrava en las ciudades mediterráneas debido al plus térmico de la cuenca del Mediterráneo (hotspot), y por el efecto de la isla de calor. Así, la temperatura media anual en el centro de Barcelona roza hoy los 18 °C (Barnolas et al., 2023), unos 2 °C por encima de la media de hace un siglo. El número anual de noches tropicales en la parte alta del Raval ha superado en los últimos años el centenar, y el número de noches tórridas (Tm>25°C) ha superado el mes. Igualmente, las olas de calor, cada vez más frecuentes, intensas y largas, producen de día valores térmicos del aire y de las superficies de la ciudad incompatibles con el confort

climático y tienen repercusiones negativas en la salud humana. Se impone el despliegue de medidas adaptativas para proteger a los barceloneses del calor extremo (Tabla 1). Una de las actuaciones más destacadas que se han llevado a cabo en Barcelona es la red de refugios climáticos, con cerca de 400 espacios operativos en el verano de 2025, complementados con microrrefugios. La ciudad se ha convertido en un modelo para las urbes españolas y extranjeras (Royé, et al. 2026), pese a las limitaciones y carencias de algunos refugios, como, por ejemplo, el horario acotado o el hecho de que parte de la población no los conozca. El sombreado es una de las estrategias para mitigar el calor urbano, a pequeña escala. Se puede conseguir mediante la plantación de árboles o con la instalación de estructuras artificiales. En 2024, el Ayuntamiento de Barcelona instaló tres estructuras piloto de sombra, de diferentes tipos, para su evaluación. Hoy ya dispone de toldos en un número creciente.

PROCEDIMIENTO	BENEFICIOS
Refugios climáticos	Acoger personas de día, en especial durante los episodios de temperaturas extremas, en un ambiente con temperatura agradable y disponibilidad de agua
Reverdecimiento: parques, jardines e interiores de manzana	Atenuación de las islas de calor superficial y del aire. Mejora ambiental
Reverdecimiento: ejes verdes y supermanzanas	Disminución leve de la temperatura del aire y acusada de ciertas superficies. Disminución de la contaminación atmosférica. Pacificación del tránsito. Mejora ambiental
Reverdecimiento: cubiertas verdes (*green roofs*) y muros verdes (*green walls*)	Ahorro energético. Mejora ambiental
Huertos urbanos	Esponjado de la trama urbana. Mejora ambiental
Toldos y estructuras que proveen sombra	Atenuación de la radiación solar incidente por sombreado
Pérgolas	Atenuación de la radiación solar incidente por sombreado. Mejora ambiental
Agua nebulizada	Disminución de la temperatura por evaporación
Cubiertas frías (*cool roofs*) y superficies blancas	Disminución de la temperatura por aumento del albedo (y de la emisividad)
Naturalización del suelo	Permeabilización del suelo y disminución de la temperatura por evaporación de agua de lluvia o de riego
Láminas de agua	Moderación de la temperatura por la elevada capacidad calorífica del agua

Tabla 1: Procedimientos para atenuar el calor extremo en una ciudad. Fuente: Martín-Vide y Moreno-García (2026).

METODOLOGÍA

En la primavera y el verano de 2025 los autores de este artículo llevaron a cabo una campaña de medición de las temperaturas de la superficie, tanto debajo como fuera de la sombra, en la estructura piloto municipal de la rambla de Badal, 113 de Barcelona, llamada "Trencadís". Con un termómetro de infrarrojos Optex Thermo-Hunter PT-2LD se midieron las temperaturas en 34 fechas de jornadas soleadas, con radiación solar directa durante la observación, entre el 7 de mayo y el 27 de julio, sobre las 14.20 h (TU) de media, hora muy próxima a la del registro de la temperatura máxima del aire.

La superficie a la sombra y al sol donde se realizaron las mediciones corresponde a un tipo de pavimento bastante estándar en la ciudad, de color gris ligeramente claro. Como complemento, se realizaron observaciones de nubosidad (cantidad y géneros nubosos), fuerza del viento en una escala cualitativa y temperatura del asfalto de una calle cercana al lugar de observación. Asimismo, se consideró la temperatura del aire de dos estaciones del Servicio Meteorológico de Cataluña (Barcelona-Raval y Barcelona-Zona Universitaria) a la hora de la observación.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El principal resultado fue que la diferencia entre la temperatura de la superficie bajo la estructura de sombra y la de la superficie adyacente sin sombra es grande: 18 °C. Los 55 °C de media a los que llega el pavimento cuando está expuesto al sol nos impedirían andar descalzos, sentiríamos que el suelo quema. El efecto negativo de la temperatura radiante de una superficie con dicho valor es considerable, mientras que, bajo la sombra, los 37 °C de media ofrecen cierto alivio —si no se realiza actividad física—, alejado, aun así, del confort climático. Esta diferencia de 18 °C es bastante constante en el caso estudiado, que abarca desde días primaverales, a principios de mayo, hasta días que pertenecen a la primera ola de calor del verano de 2025, registrada a finales de junio y comienzos de julio. Precisamente, los valores térmicos máximos registrados correspondieron a aquellos días: 44 °C fue la temperatura de la superficie bajo el toldo el 30 de junio; 63 °C, la temperatura de la superficie al sol, el 29 de junio; y 65 °C, la temperatura del asfalto, los días 28, 29 y 30 de junio. Desde un punto de vista estadístico, los registros de las temperaturas de las superficies a la sombra y al sol muestran una correlación lineal casi perfecta ($R = 0,96$; p-value = 0,000) (Figura 1).

La diferencia de temperatura entre la superficie y el asfalto, ambas expuestas al sol, fue de 3,8 °C, es decir, relativamente corta, probablemente debido a que el asfalto medido tiene un color no muy oscuro, grisáceo, poco distinto al de la superficie del lugar de estudio. Esto nos advierte de que hay que elegir cuidadosamente el tipo de pavimento (composición, color y albedo, porosidad, capacidad calorífica, etc.) para

que absorba el mínimo de radiación, de forma que la temperatura aumente poco y, al mismo tiempo, sin que la reflexión de luz solar deslumbre a los peatones.

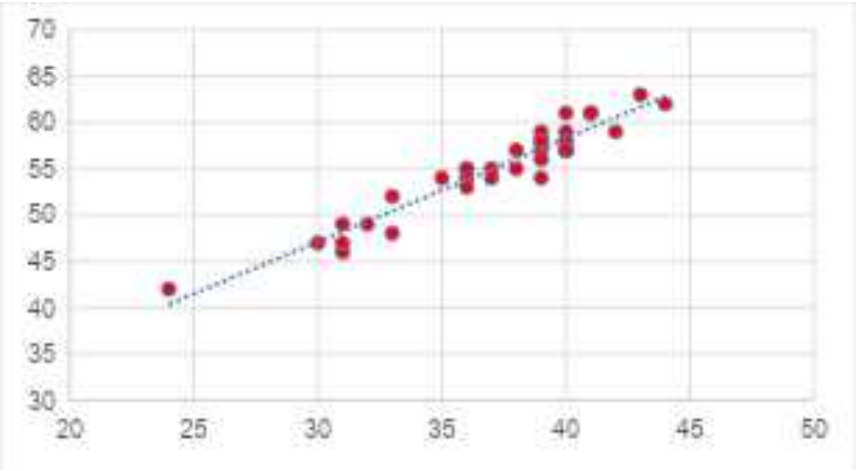


Figura 1: Temperatura de la superficie a la sombra (X) versus temperatura de la superficie al sol (Y) (ºC) y recta de regresión.

La estructura de sombreado analizada, de palos de madera y toldos de lona de color gris-crema, no ofrece una sombra densa, sino una atenuación de la luz solar directa, por lo que existe una diferencia apreciable de más de 8 °C entre la temperatura del aire y la de la superficie bajo el toldo. Hay que recordar que la temperatura del aire al sol y a la sombra es similar, pero no así la temperatura de las superficies. En cualquier caso, se necesitan sombras más densas para atenuar las temperaturas radiantes elevadas durante los días de verano.

CONCLUSIONES

Barcelona, donde el sol alcanza los 72° de altura sobre el horizonte en el mediodía astronómico del solsticio de verano, debe ampliar el número de estructuras de sombreado para proteger a la ciudadanía del calor extremo. Con el aumento de la frecuencia, la intensidad y la duración de las olas de calor, se debe elegir, en cada caso, el tipo de toldo o de estructura más adecuado. La diferencia de temperatura entre una superficie expuesta al sol y otra similar en sombra es cercana a 20ºC, en las horas centrales de una jornada estival.

REFERENCIAS

Barnolas, M., Prohom, M., Serra, A., Martín-Vide, J. (2023). *Atles Climàtic de Catalunya 1991-2020. Termopluviometria mitjana*. Nota d'Estudi, 75, Servei Meteorològic de Catalunya, 46 p. https://doi:10.13140/RG.2.2.23173.12007.

Martin-Vide, J., Moreno-García, M.C. (2024). Unas notas sobre la emergencia climática: ciudades y salud. *GEO Uerj*, 46, e87631. https://doi.org/10.12957/geouerj.2024.87631.

Martin-Vide, J., Moreno-García, M.C. (2026). Adaptaciones urbanas frente al exceso de calor en Barcelona: el caso de los toldos. *Barcelona Metròpolis*, 138.

Royé, D., Amorim-Maia, A.T., Jiménez-Navarro, E., López-Díez, A., Tobías, A., Martin-Vide, J., Olazabal, M. (2026). Pioneering Spanish experience in climate shelters practice. *Nature Climate Change*, 16, 378-381. https://doi.org/10.1038/s41558-026-02587-z

EL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA ORDENACIÓN TERRITORIAL DE CANARIAS

Eduardo RISUEÑO DÍAZ[1], Adrián PASCUAL ESPINO[2], Gustavo PESTANA PÉREZ[3]

[1]*Universidad de La Laguna*
[2]*Gesplan, S.A.*
[3]*Consejería de Transición Ecológica y Energía del Gobierno de Canarias*

erisueno@ull.es; apasesp@gesplan.es; gpesper@gobiernodecanarias.org.

RESUMEN

El cambio climático repercute de manera significa en territorios insulares como es Canarias. Por ello, desde el Gobierno de Canarias se han propulsado medidas legislativas que repercuten de manera transversal sobre el conjunto de los sectores socioeconómicos y ambientales, siendo el modelo territorial el campo de juego en el que se articulan las medidas de mitigación y adaptación. En uno de las áreas con mayor biodiversidad de Europa es preciso definir adecuadamente criterios de salvaguarda en los instrumentos de planificación, creando sinergias con las metas de transición energética. Dos claros supuestos en los que las propuestas normativas y la ordenación territorial están teniendo una clara incidencia en la lucha contra el cambio climático son los Proyectos de Acción Climática (art. 19 de la LCCTEC) y las Zonas de Aceleración de Energías Renovables (Decreto-ley 5/2024, de 24 de junio), formulándose, por ejemplo, la renaturalización, adaptación y protección de entornos urbanos, con la primera de las figuras; y la implementación preferente de energías renovables mediante el consenso entre Cabildos insulares y la Consejería de Transición Ecológica y Energía del Gobierno de Canarias.

Palabras clave: Cambio climático, ordenación del territorio, infraestructura verde, transición energética.

ABSTRACT

Climate change has a significant impact on island territories such as the Canary Islands. For this reason, the Canary Islands Government has promoted legislative measures that have a cross-cutting impact on all socio-economic and environmental sectors, with the territorial model being the playing field in which mitigation and adaptation measures are articulated. In one of the areas with the greatest biodiversity in Europe, it is necessary to adequately define safeguard criteria in planning instruments, creating synergies with energy transition goals. Two clear examples

where regulatory proposals and spatial planning are having a significant impact on the fight against climate change are the Climate Action Projects (Article 19 of the LCCTEC) and the Renewable Energy Acceleration Zones (Decree-Law 5/2024 of 24 June), which are being implemented, for example, the renaturalisation, adaptation and protection of the urban environment, under the first of these schemes; and the preferential implementation of renewable energy through consensus between the island councils and the Regional Ministry of Ecological Transition and Energy.

Key words: Climate change, land use planning, green infrastructure, energy transition.

INTRODUCCIÓN

El cambio climático, generado principalmente por causas antropogénicas, está alterando de forma evidente las condiciones de vida mediante fenómenos como el aumento de temperaturas, eventos extremos y la subida del nivel del mar, lo que ha motivado su incorporación progresiva al ordenamiento jurídico como respuesta y mecanismo de adaptación, constituyendo el Derecho una construcción social para la transición de los modelos socioeconómicos (VILAJOSANA RUBIO, 2010).

En el caso de Canarias, su condición de región ultraperiférica, junto con su alta biodiversidad y baja renta per cápita, incrementa su vulnerabilidad, de modo que el calentamiento global representa una amenaza relevante, tanto para su equilibrio ambiental como para su desarrollo socioeconómico.

Diversos estudios científicos han evidenciado los efectos de la variabilidad climática en el territorio canario. A título ilustrativo, las proyecciones regionalizadas elaboradas por la Universidad de La Laguna (ULL) estiman un incremento térmico de entre 1,9 ºC y 2,5 ºC en el archipiélago hacia finales de siglo bajo el escenario SSP2-4.5 (SANTAMARTA, 2025). Asimismo, en el marco del proyecto PIMA Adapta Costas, se han identificado 47 puntos de riesgo acumulado en el litoral canario, advirtiéndose que la ausencia de medidas podría traducirse en pérdidas económicas equivalentes a aproximadamente el 11 % del PIB regional a finales de siglo. Por otra parte, investigaciones desarrolladas por la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria y el Instituto Español de Oceanografía han constatado un aumento de medio grado centígrado en la temperatura de las aguas marinas en un periodo de 25 años.



Figura 1. Aumento de la temperatura por década en el núcleo turístico de Playa del Inglés, Gran Canaria. Fuente: Atlas Climático de Canarias.

La respuesta institucional al cambio climático en Canarias se articula a través de la Ley de cambio climático y transición energética de Canarias (LCCTEC), que fija como metas: la descarbonización para 2040 y el refuerzo de la resiliencia, desarrollando una política basada en la planificación normativa y la ejecución de proyectos piloto de adaptación. Estas actuaciones presentan una clara dimensión territorial, ya que el despliegue de energías renovables requiere suelo e infraestructuras, mientras que las medidas de adaptación se concentran en espacios urbanizados o con alta presión antrópica, con el fin de reducir riesgos y vulnerabilidades futuras.

LA REALIDAD CLIMÁTICA DE CANARIAS. CONSECUENCIAS PALPABLES

El clima de Canarias, generalmente templado y con precipitaciones escasas concentradas en invierno, responde a una dinámica compleja determinada por su localización y la influencia de la célula de Hadley, a través del anticiclón de las Azores. Su variabilidad estacional permite la entrada de borrascas en invierno, el predominio de los vientos alisios el resto del año y, de forma ocasional, episodios de aire sahariano. La compleja orografía insular favorece la existencia de numerosos microclimas, que sustentan una elevada biodiversidad y un paisaje singular de gran valor económico y turístico. No obstante, el incremento de G.E.I., constatado por el Observatorio de Izaña, ha alterado el balance radiactivo terrestre, situando las concentraciones de CO_2 en niveles no registrados desde hace milenios.

En las últimas décadas, Canarias ha experimentado un aumento térmico generalizado de aproximadamente 0,3 ºC por década, junto con una disminución de las precipitaciones y un ascenso del nivel del mar de unos 10 cm desde 1990.

Por su parte, el Gobierno de Canarias, en colaboración con ULL, ha desarrollado proyecciones climáticas de alta resolución para el conjunto del siglo XXI, orientadas a evaluar los impactos del calentamiento global sobre el archipiélago. Dichas proyecciones permiten sintetizar los efectos esperados en tres grandes tendencias: un aumento generalizado de las temperaturas, hasta 5 ºC en zonas de mayor altitud; una reducción de las precipitaciones estimada entre un 30 % y un 40 %; y un incremento del nivel medio del mar que podría alcanzar en torno a un metro hacia finales de siglo. No obstante, es preciso señalar que estos valores medios no reflejan plenamente la intensificación de fenómenos extremos, destacando, entre ellos, el aumento en la frecuencia e intensidad de las olas de calor.

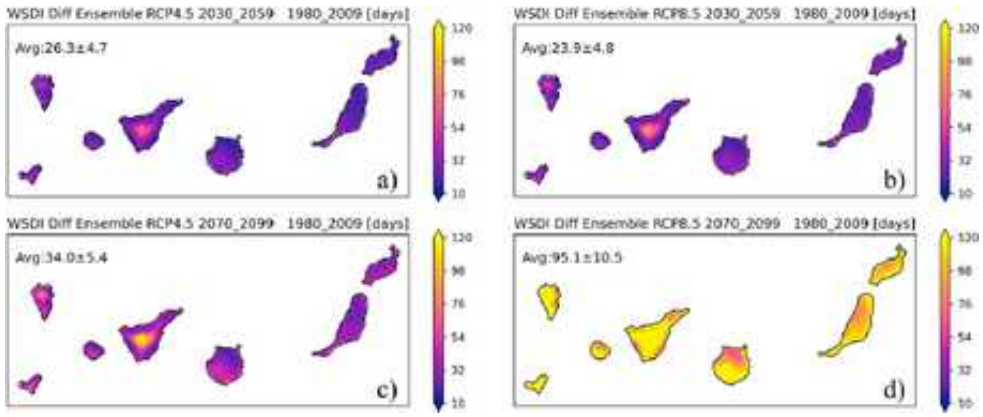


Figura 2. Aumento de días en ola de Calor, a 2050-2100, según el RPC4.5 y el RPC8.5. Fuente: GOTA (ULL).

INTEGRACIÓN DE LA "VARIABLE CAMBIO CLIMÁTICO" EN EL ORDENAMIENTO TERRITORIAL

La incorporación del cambio climático en la planificación y ordenación del territorio en Canarias constituye un eje estratégico para reforzar la resiliencia ambiental, social y económica. El marco normativo, encabezado por la LCCTEC y reforzado por el Decreto-ley 5/2024, de 24 de junio, impone la integración de la acción climática en las políticas públicas y, en particular, en los instrumentos de ordenación territorial, abarcando tanto la mitigación de emisiones como la adaptación a riesgos presentes y futuros. En este sentido, la ordenación territorial debe adoptar un enfoque preventivo y sostenible que oriente el desarrollo urbano, las infraestructuras y la protección del medio natural. Esta integración se articula a través de tres vías principales: su incorporación en los instrumentos de planeamiento, su consideración en los procesos de evaluación ambiental y su garantía mediante la legislación del suelo.

Para evitar un impacto significativo sobre la biodiversidad y otros valores naturales, se establecerá una zonificación que identifique áreas de sensibilidad y exclusión para nuevas instalaciones de producción energética renovable, la disposición adicional

tercera del Decreto-ley 5/2024 prevé la designación de "zonas de aceleración de energías renovables" mediante Decreto del Gobierno, a propuesta de la Consejería competente en energía y mitigación, con la colaboración de los Cabildos insulares y otros órganos del Gobierno de Canarias, priorizándose para ello áreas antropizadas.

El Estatuto de Autonomía de Canarias, en su artículo 37.15, establece como principio rector la preservación y mejora del medio ambiente y la biodiversidad del Archipiélago para mitigar el cambio climático. Asimismo, el artículo 153.1 ñ), atribuye a la Comunidad Autónoma la competencia legislativa y ejecutiva en materia ambiental, incluyendo las medidas contra el cambio climático. En ejercicio de esta competencia, se aprobó la mencionada LCCTEC, que integra la perspectiva climática en la ordenación territorial y urbanística. Su artículo 20 exige que los instrumentos de ordenación ambiental, territorial, urbanística y sectorial consideren los efectos y causas del cambio climático, especialmente en aspectos como la densidad urbana, conservación forestal, protección del suelo y limitación del crecimiento urbano, justificando las medidas adoptadas en sus memorias. Por mandato legal, dichos instrumentos deberán: fomentar modelos urbanos compactos que optimicen la ocupación del territorio y promuevan un uso más eficiente e intensivo de terrenos ya urbanizados; asegurar que las nuevas urbanizaciones incorporen provisión energética basada en fuentes renovables, buscando la máxima autosuficiencia energética; y en la creación, modificación o transformación de instrumentos urbanísticos, se promoverán soluciones basadas en la naturaleza, incluyendo un mínimo de 10 m² de zona verde por habitante y un árbol por cada tres habitantes.

El referido texto legal establece que los Proyectos de Acción Climática pueden derogar de manera específica el planeamiento urbanístico para permitir obras de interés general en áreas prioritarias para la adaptación al cambio climático, que serán definidas por cada proyecto, consultándose al Cabildo Insular y a los Ayuntamientos afectados (ej. consulta al Cabildo de Tenerife y Ayuntamiento de Arona en la propuesta sobre el núcleo de Las Galletas), pero si hubiera desacuerdo, la decisión final será tomada por el Gobierno autonómico.

REFERENCIAS

VILAJOSANA RUBIO, J.M. (2010): *"La construcción social de la realidad jurídica"*, Revista de Ciencias Sociales n.º 4.

SANTAMARTA, J. C., & CRUZ-PÉREZ, N. (2025). *"Agua y cambio climático en las Islas Canarias"*. Universidad de La Laguna.

SANTANA CASIANO, J.M. (2020): *"Más de 20 años estudiando la acidificación oceánica en Canarias"*, Servicio de Publicaciones y Difusión Científica de la ULPGC.

PERSISTENCIA DE HELADAS MEDIANTE PROBABILIDADES CONDICIONALES AL NOROESTE DE ESPAÑA

Eduardo PÉREZ SOSA[1], Roberto SERRANO NOTIVOLI[1], Miguel Ángel SAZ[1], María Luz HERNÁNDEZ NAVARRO[2]

[1] Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio. Clima, Agua, Cambio Global y Sistemas Naturales. Instituto Universitario de Investigación en Ciencias Ambientales de Aragón.
[2] Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio. Grupo de Estudios de Ordenación del Territorio. Instituto Universitario de Investigación en Ciencias Ambientales de Aragón

eduardo.perez@unizar.es, roberto.serrano@unizar.es, masaz@unizar.es, mlhernan@unizar.es

RESUMEN

La transición hacia condiciones de temperaturas más cálidas no implica una reducción del riesgo de heladas. En este contexto, nos preguntamos, si la ocurrencia de heladas puede analizarse desde un enfoque estadístico como un fenómeno persistente. A partir de las temperaturas mínimas diarias a alta resolución espacial (1 km2) del periodo 1950-2020 en Aragón, España, se analizaron las heladas integradas en un indicador denominado márgenes de seguridad de heladas (FSM, por sus siglas en inglés) construido a partir de las fechas de los últimos eventos de heladas por año y su diferencia en días. Las series de tiempo de los márgenes de seguridad fueron analizadas como cadenas de Markov de tiempo discreto. Para evaluar la incertidumbre y no estacionariedad de las probabilidades de transición por década se utilizó la entropía de Shannon y la distancia Frobenius normalizadas. Los patrones espaciales revelaron un fuerte gradiente altitudinal: las elevaciones más altas exhibieron menos tipos de FSM, mayor persistencia, menor diversidad de transición efectiva y un rendimiento predictivo sustancialmente mejorado. Al respecto, no podemos afirmar que el comportamiento de las probabilidades de transición sea estacionario, pero comprobamos que, en los periodos de baja entropía, los FSM transitaron hacia los FSM persistentes.

Palabras clave: heladas tardías, riesgo agroclimático, frutales, márgenes de seguridad

ABSTRACT

The transition toward warmer temperature conditions do not imply a reduction in frost risk. In this context, we ask whether the occurrence of frost can be analyzed from a statistical perspective as a persistent phenomenon. Using high spatial resolution

(1 km²) daily minimum temperature data for the period 1950–2020 in Aragón, frost events were analyzed through an indicator called frost safety margins (FSM). This indicator was constructed based on the dates of the last frost events each year and their differences in days. The time series of FSMs was analyzed as discrete-time Markov chains. To assess the uncertainty and non-stationarity of transition probabilities by decade, Shannon entropy and the Frobenius distance normalized were applied. The results show a negative relationship between the number of FSM and altitude. The spatial patterns revealed a strong altitudinal gradient: higher elevations exhibited fewer FSM types, greater persistence, lower effective transition diversity, and substantially improved predictive performance. In this regard, we cannot conclude that the behavior of transition probabilities is stationary, but we observed that, during periods of low entropy, FSM transitioned toward persistent FSM.

Key words: frost risk, agroclimatology, fruit trees, frost safety margins

INTRODUCCIÓN

Los árboles frutales responden a las condiciones climáticas anuales ajustando el momento del desarrollo de las yemas para minimizar el riesgo de años por heladas (Zohner et al., 2020), habiendo evolucionado para iniciar el crecimiento en primavera en consonancia con la probabilidad histórica de heladas tardías (Lenz et al., 2016). Consecuentemente, las heladas tardías representan uno de los mayores riesgos agroclimáticos, limitando la distribución altitudinal y latitudinal de las especies de árboles (Kollas et al., 2014). Entre los métodos desarrollados para evaluar la sensibilidad a las heladas durante las etapas críticas, el margen de seguridad de heladas (en adelante FSM, por sus siglas en inglés) propuesto por Lenz et al. (2016) ha surgido como una métrica útil. Sin embargo, para el cálculo de los FSM se requieren datos climáticos y fenológicos de alta resolución temporal a menudo disponibles solo en entornos experimentales con especies silvestres en latitudes altas y medias (Zohner et al., 2020). El objetivo consistió en comprobar que la persistencia de heladas puede ser abordada mediante el indicador basado en FSM para la caracterización agroclimática en ausencia de observaciones fenológicas, analizada mediante cadenas de Markov de tiempo discreto. El área de estudio correspondió a la Comunidad Autónoma de Aragón debido a su relevancia como región de producción de frutales y por la alta incidencia de eventos de heladas.

METODOLOGÍA

Datos climáticos

Las temperaturas mínimas del aire para el periodo 1950-2020 fueron obtenidas de SiCLIMA (Serrano-Notivoli et al., 2024), se tratan de datos en rejilla a escala diaria a una resolución espacial de 1 km2 generadas a partir de registros de más de 1200

estaciones climáticas mediante modelos lineales (GLMMs y GLMS). A partir de los datos de temperatura en rejilla de Aragón, los FSM se calcularon como secuencias anuales de la serie histórica para cada pixel. Las secuencias formadas se analizaron como cadenas de Markov de tiempo discreto a través del paquete de R markovchain (Spedicato, 2017).

Construcción de los márgenes de seguridad de heladas

Los FSM propuestos por Lenz et al. (2016) se adaptaron para el contexto en el que no se cuentan con observaciones fenológicas de alta precisión. Los FSM categóricos en esta investigación se basaron en la fecha de la penúltima y última helada de cada año. Cada evento anual se asignó primero a uno de los doce grupos estacionales según la combinación de los períodos mensuales de la penúltima y última helada. Posteriormente, cada FSM se subdividió según la duración del período libre de heladas entre la penúltima y la última helada, definida como: a (0-7 días), b (8-14 días) y c (≥15 días). Debido a la construcción matemática de las ventanas, los grupos 3, 4, 7 y 12 solo pueden presentar la subcategoría c, mientras que los restantes pueden presentar a, b o c. Este esquema dio como resultado un total de 28 categorías FSM válidas (Figura 1).

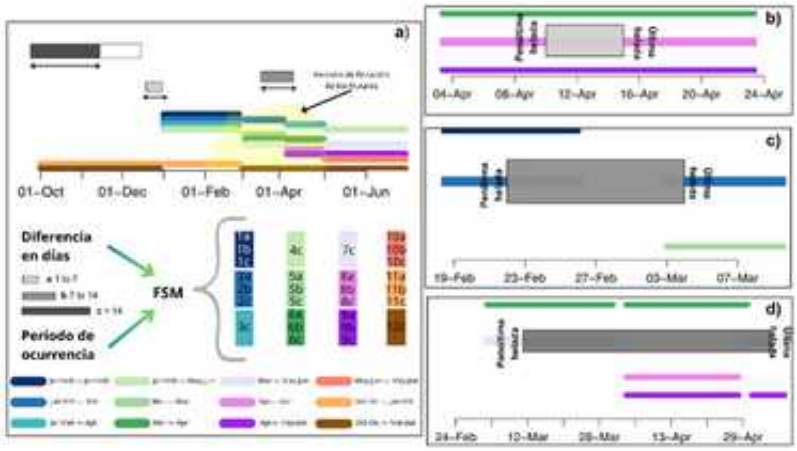


Figura 1. Resumen de la clasificación de los FSMs (a) y tres ejemplos de clasificación de FSM (b-d).

Márgenes de seguridad de heladas como cadenas de Markov de tiempo discreto

La base de las cadenas de Markov es la matriz de probabilidades de transición () que contiene las probabilidades de transición (es la probabilidad de que el proceso transite del estado al estado , en este contexto de que un FSM transite a otros FSM). Debido a que el objetivo fue determinar la probabilidad de que un proceso en estado esté en estado después de pasos, es decir, , la matriz de probabilidades de transición se obtiene a partir de (ver Spedicato, 2017), y con ella, la probabilidad de ocurrencia, persistencia y recurrencia de los FSM.

Incertidumbre y no estacionariedad de las probabilidades de transición

Los FSM menos frecuentes (<10) se agruparon en una sola categoría para reducir el ruido. Luego, las matrices de transición se recalcularon por rangos de elevación y por décadas; debido a que las transiciones faltantes entre FSM (probabilidad igual a 0) o probabilidades iguales a 1 son comunes, se aplicó un suavizado aditivo.

Para evaluar la dispersión de las probabilidades de transición, se empleó la entropía de Shannon (Shannon, 1948). En este contexto, mide la incertidumbre en las transiciones salientes de un FSM a otro; si las probabilidades se concentran en unas pocas categorías, la entropía es baja; por el contrario, si se distribuyen uniformemente, la entropía es máxima.

En adición, se utilizó la norma de Frobenius (Ford, 2015) para cuantificar la diferencia entre dos matrices; se define como la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las diferencias de cada par de elementos y en su versión normalizada, dividida por la raíz del número de estados comunes. Para realizar el cálculo, se requieren matrices simétricas. En este contexto, las matrices de transición difieren, por lo tanto, solo se comparó el conjunto de estados compartidos entre décadas. Esto ofrece la ventaja de una comparación directa, pero se pierde información de otras transiciones.

RESULTADOS

Los márgenes de seguridad en Aragón España

Las heladas medias y su probabilidad de ocurrencia en Aragón mostraron un patrón espacial consistente con la altitud (Figura 2ab). Las áreas de mayor altitud agruparon a las heladas que ocurren después de mayo (grupo 10, sectores norte y sur) y mostraron las mayores probabilidades de ocurrencia. A medida que disminuía la altitud, los FSM asociados con las heladas de abril (grupo 8, sectores norte y sur) mostraron la mayor extensión espacial y probabilidades de ocurrencia intermedias. Las heladas tardías que ocurren en marzo (grupo 5, región central) caracterizaron las áreas de altitud intermedia, mientras que las heladas registradas entre enero y febrero (grupo 1) se concentraron en la parte oriental de Aragón y mostraron las probabilidades de ocurrencia más bajas. Una vez que se produjo el FSM medio, el tiempo medio de recurrencia fue más corto en altitudes más elevadas, con intervalos de 2 a 4 años. En el resto de la región, el tiempo medio de recurrencia osciló entre 4 y 6 años, sin un patrón espacial claramente definido (Figura 2c). Se obtuvo un promedio de 2 a 16 tipos de FSM, con la mayoría de los sitios presentando entre 8 y 12 tipos (Figura 2d).

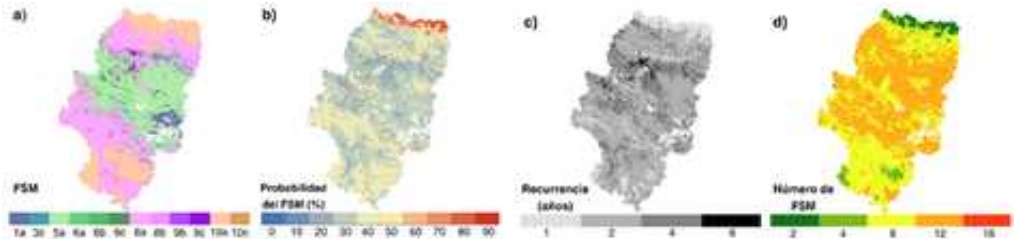


Figura 2. Márgenes de seguridad persistentes (a), probabilidad de ocurrencia de los márgenes persistentes(b), recurrencia (c) y número de márgenes de seguridad (d).

Tendencias en las matrices de transición de los márgenes de seguridad de heladas

Los rangos de altitud baja y media exhibieron menor persistencia, mayor incertidumbre en la transición y mayores cambios estructurales entre décadas consecutivas, lo que sugiere regímenes de transición más heterogéneos y menos predecibles. Por el contrario, las altitudes superiores a 2000 m.s.n.m. se caracterizaron por mayor persistencia, entropía y distancias de Frobenius normalizadas más pequeñas, lo que refleja una estructura de transición más estable dominada por el FSM 10a (heladas muy tardías, entre mayo y abril de margen corto).

DISCUSIÓN

Los FSM como indicador tienen la capacidad para capturar patrones estables e interpretables en la cronología de las heladas en el espacio y el tiempo. La discretización basada en regímenes se ha utilizado en la investigación de la variabilidad atmosférica y climática para resumir los modos dominantes de variabilidad y el comportamiento de transición (Strommen et al., 2023). Si bien el marco de Markov es útil para resumir las estructuras de transición dominantes, no representa explícitamente la memoria climática a largo plazo ni los factores determinantes sinópticos. Además, los extremos climáticos y los índices climáticos están sujetos a cambios no estacionarios en condiciones climáticas cambiantes, como se destaca en evaluaciones recientes de los factores determinantes del impacto climático. En trabajos futuros se podría mejorar el marco FSM integrando predictores adicionales, como métricas de severidad, anomalías de temperatura o acumulación de frío, y acoplando FSM con modelos fenológicos.

REFERENCIAS

Ford, W. (2015). Vector and matrix norms. In W. Ford, Numerical linear algebra with applications (pp. 119–144). Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394435-682 1.00007-7

Kollas C, Randin CF, Vitasse Y, Körner C. (2014). How accurately can minimum temperatures at the cold limits of tree species be extrapolated from weather station data? *Agricultural and Forest Meteorology*, 184, 257-266. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.10.001

Lenz A, Hoch G, Körner C, Vitasse Y. (2016). Convergence of leaf-out towards minimum risk of freezing damage in temperate trees. *Funct Ecol*, 30(9), 1480-1490. https://doi.org/10.1111/1365-2435.12623

Serrano-Notivoli R, Saz MA, Longares LA, de Luis M. (2024). SiCLIMA: High-resolution hydroclimate and temperature dataset for Aragón (Northeast Spain). *Data in Brief*, 56. https://doi.org/10.1016/j.dib.2024.110876

Shannon CE. (1948). A mathematical theory of communication. *The Bell System Technical Journal*, 27(3), 379-423. https://doi.org/10.1002/j.15387305.1948.tb01338.x

Spedicato G (2017) Discrete Time Markov Chains with R. *The R Journal*, 9(2), 84–104. https://journal.r-project.org/archive/2017/RJ-2017-036/index.html

Strommen K, Chantry M, Dorrington J, Otter N. (2023). A topological perspective on weather regimes. *Clim Dyn*. 60, 1415–1445. https://doi.org/10.1007/s00382022-06395-x

Zohner CM, Mo L, Sebald V, Renner SS. (2020). Leaf-out in northern ecotypes of wide ranging trees requires less spring warming, enhancing the risk of spring frost damage at cold range limits. *Global Ecology and Biogeography*, 29(6), 1065-1072. https://doi.org/10.1111/geb.13088

PATRONES ESPACIALES DE LOS ÍNDICES DE EXTREMOS CLIMÁTICOS EN CATALUÑA (1991-2020)

Javier MARTÍN-VIDE[1], Mercè BARNOLAS-VILADES[2], Antoni BARRERA-ESCODA[2], Marc PROHOM-DURAN[2], Aleix SERRA-URÓ[2]

[1] *Universitat de Barcelona y Observatorio Fabra (RACAB)*
[2] *Servei Meteorològic de Catalunya*

jmartinvide@ub.edu, merce.barnolas@gencat.cat, toni.barrera@gencat.cat, marc.prohom@gencat.cat, aleix.serra@gencat.cat

RESUMEN

En base a los resultados cartográficos de los mapas de los índices de extremos climáticos incorporados, en diciembre de 2025, al Atles Climàtic de Catalunya 1991-2020 (SMC, 2023), con una resolución espacial de 1 km2, los objetivos de la presente aportación son: 1) presentar los patrones espaciales de los principales índices; 2) relacionar los patrones con factores geográficos y climáticos, y 3) presentar el mapa del Índice de Disparidad Consecutiva (D) de la precipitación media mensual (Martin-Vide et al., 2022), a partir de las series disponibles para el Atles, que no está incluido en el mismo. Como ocurre con las temperaturas medias, los índices de extremos térmicos (número de noches tropicales, número de días cálidos, temperatura máxima absoluta, etc.) están influidos por la altitud, pero matizada por la continentalidad, en el caso de los índices de valores máximos, y por los efectos locales urbanos, en los índices de valores mínimos. En los índices de extremos pluviométricos la distancia al mar se sobrepone a la altitud. El D varía entre 0,19, en Vilamòs y Arres de Jos, en el valle de Arán, a más de 1.200 m de altitud, y 0,54, en Arnes, en la provincia de Tarragona en su límite con la de Teruel, a unos 500 m. Con los valores conocidos para la España peninsular, la variación es muy elevada, con un claro patrón espacial latitudinal y algunos retoques comarcales.

Palabras clave: Cataluña, correlación lineal, Índice de Disparidad Consecutiva, Índices de extremos climáticos, patrón espacial.

ABSTRACT

Based on the cartographic results of the climate extremes index maps incorporated in December 2025 into the Climatic Atlas of Catalonia 1991-2020 (SMC, 2023), with a spatial resolution of 1 km2, the objectives of this contribution are: 1) to present the spatial patterns of the main indices; 2) to relate these patterns to geographical and climatic factors; and 3) to present the map of the Consecutive Disparity Index (D) of mean monthly precipitation (Martin-Vide et al., 202X), based on the series available for

the atlas, which is not included in it. As with mean temperatures, thermal extreme indices (number of tropical nights, number of warm days, absolute maximum temperature, etc.) are influenced by altitude, though nuanced by continentality in the case of maximum value indices, and by local urban effects in the case of minimum value indices. Regarding rainfall extreme indices, distance from the sea takes precedence over altitude. The D index varies between 0.19 in Vilamòs and Arres de Jos (Aran Valley, at an altitude of over 1,200 m) and 0.54 in Arnes (Tarragona province, on the border with Teruel, at about 500 m). Compared to the known values for mainland Spain, the variation is very high, showing a clear latitudinal spatial pattern along with some local regional adjustments.

Key words: Catalonia, linear correlation, Consecutive Disparity Index, climate extreme indices, spatial pattern.

INTRODUCCIÓN

En 2023 el Servei Meteoològic de Catalunya (SMC) publicó el Atles Climàtic de Catalunya 1991-2020 (Barnolas, et. al., 2023), atlas termopluviométrico de valores medios o normales, que actualizaba el atlas anterior sobre el período 1961-1990, con un tratamiento de base y cartográfico exclusivamente digital. El resultado se concretó en: 17 mapas de temperatura media (12 mensuales, 4 estacionales y 1 anual), 17 de temperatura media de las máximas, 17 de temperatura media de las mínimas, 1 de amplitud térmica media anual, 17 de precipitación media y 1 de régimen pluviométrico estacional. Recientemente, se han añadido al citado atlas 110 mapas de índices de extremos climáticos: 17 mapas de temperatura máxima absoluta, 17 de temperatura máxima más baja, 17 de temperatura mínima más alta, 17 de temperatura mínima absoluta, 17 de precipitación máxima acumulada en un día, 17 de precipitación máxima acumulada en 5 días, 1 de amplitud térmica diaria media anual, 1 del número medio anual de días de helada, 1 del número medio anual de noches tropicales (TN>=20ºC), 1 del número medio anual de días de calor (TX>=30ºC), 1 del número medio anual de días tórridos (TX>=35ºC), 3 del número medio anual de días con una precipitación mayor o igual de 10 mm, mayor o igual de 20 mm y mayor o igual de 50 mm, 1 de la duración media de la racha seca máxima anual y 1 ídem de la racha húmeda máxima anual.

El objetivo general de este trabajo, desglosado en tres específicos, es trazar los patrones espaciales básicos de los índices de extremos citados, en relación con los factores geográficos y climáticos, así como incorporar un nuevo mapa, el del Índice de Disparidad Consecutiva (D) de la precipitación media mensual (Martin-Vide et al., 2022), a partir de las series disponibles para el atlas.

METODOLOGÍA

La base de datos, una vez que las series de partida superaron un control de calidad riguroso, y fueron completadas y homogeneizadas, está constituida por 275 series diarias de temperatura máxima y mínima y por 323 series diarias de precipitación. Con los valores hallados a partir de ellas para las diferentes variables o índices de extremos se han obtenido, mediante diferentes métodos de interpolación, nuevos valores para cada celda de 100 m2, lo que constituye una muy elevada resolución espacial. En la regresión de los mapas térmicos se han tenido en cuenta la altitud, la distancia al mar y la latitud.

El índice D, que es el promedio de los valores absolutos del logaritmo neperiano de los cocientes entre cada valor y el precedente (Martín-Vide et al., 2022), se ha aplicado correlativamente a la precipitación media de los meses, de enero a diciembre, cerrándose, tras este mes, de nuevo con el promedio de enero.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se presentan a continuación algunos de los mapas anuales de índices climáticos extremos más representativos del Atles. Las limitaciones de espacio impiden mostrar los estacionales y mensuales. Asimismo, se comentan algunos de los comportamientos espaciales más significativos.

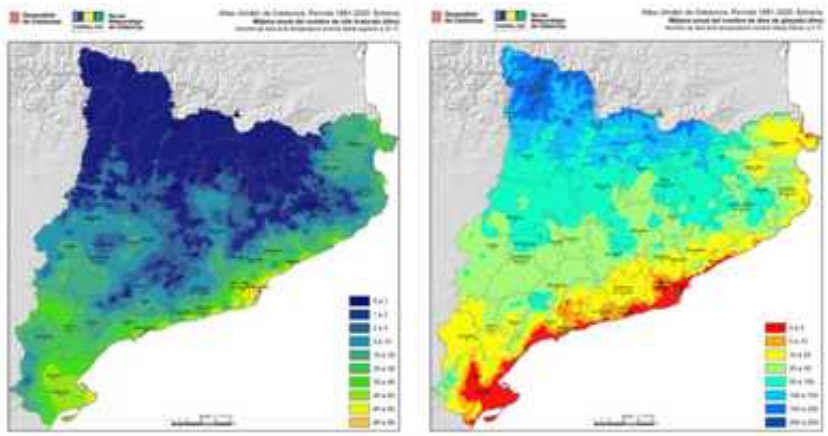


Figura 1. Mapas del número medio anual de noches tropicales (izquierda) y del número medio anual de días de helada (derecha).

Los mapas del número medio anual de noches tropicales y del número medio anual de días de helada (Figura 1) son bastante parecidos al de la temperatura media anual, dado que la altitud, la distancia al mar y, en menor medida, la latitud constituyen factores explicativos decisivos. En el caso de las noches tropicales el efecto urbano se aprecia muy bien en el caso de Barcelona y su entorno metropolitano.

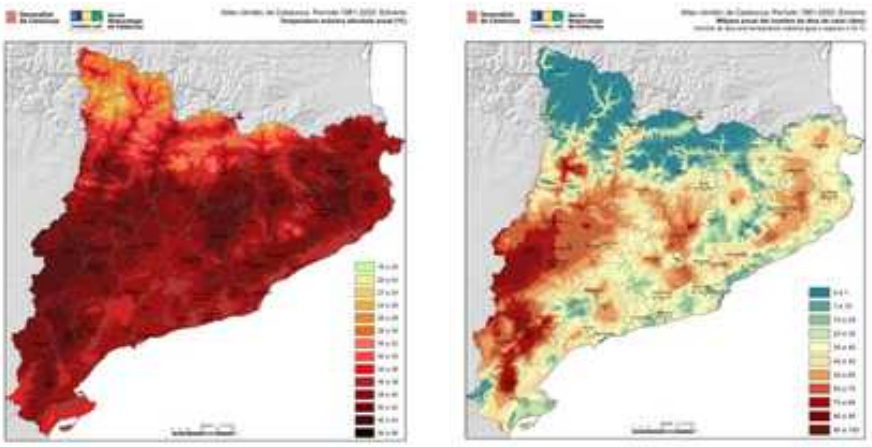


Figura 2. Mapas de la temperatura máxima absoluta (ºC) (izquierda) y del número medio anual de días de calor (derecha).

Los mapas de la temperatura máxima absoluta y del número medio anual de días de calor (Figura 2) marcan el factor continentalidad, con los máximos valores en la depresión Central catalana, especialmente en su sector más occidental, y en la depresión Prelitoral. El segundo mapa es, geográficamente, más representativo y rico en matices que el primero, dado que los valores extremos máximos están sujetos a su aleatoriedad intrínseca. Como ejemplo, en 2023, fuera del período de análisis, en el Alt Empordà (NE de Cataluña), se registró la temperatura máxima absoluta, con 45,4ºC en Figueres (Aemet). Los mapas de la temperatura mínima absoluta y de la máxima más baja (no presentados) muestran un patrón con un eje diagonal de valores crecientes desde el valle de Arán a la ciudad de Barcelona. Este eje aúna la disminución de altitud, latitud y distancia al mar y el aumento del factor urbano.

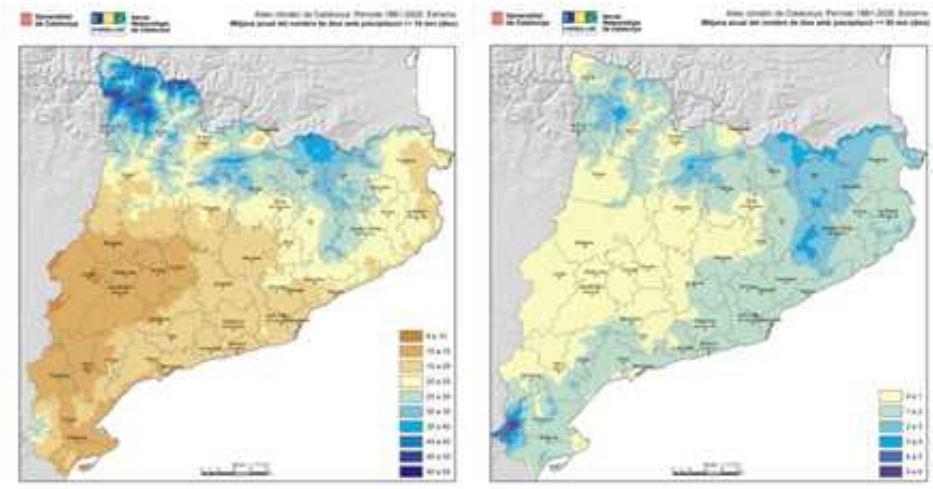


Figura 3. Mapas del número medio anual de días con precipitación mayor o igual de 10 mm (izquierda) y de 50 mm (derecha).

El mapa del número medio anual de días con precipitación mayor o igual de 10 mm (Figura 3) es similar al de precipitación media anual, con la zona pirenaica extendida hacia el Montseny como la más lluviosa y las tierras bajas de Lleida y limítrofes, las más secas. Con el umbral de 50 mm (Figura 3) cobra importancia el litoral y prelitoral, en función de los copiosos aguaceros de origen mediterráneo. Los Ports de Tortosa-Beceite adquieren una notable relevancia.

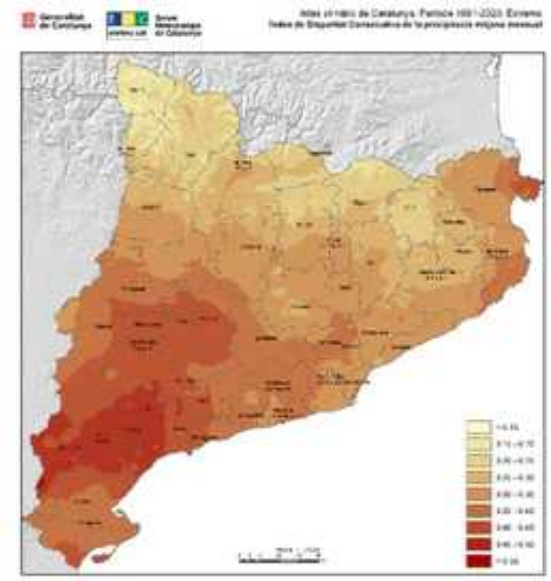


Figura 4: Mapa del índice D de la precipitación media mensual.

El mapa del índice D de la precipitación media mensual (Figura 4) muestra valores notablemente contrastados entre el Pirineo aranés y el interior occidental de la provincia de Tarragona, con valores extremos de 0,19 y 0,54.

CONCLUSIONES

En los índices de extremos térmicos cálidos la continentalidad y la escasa altitud de las depresiones Central y Prelitoral son clave, mientras que en los fríos el factor altitud es dominante. El litoral y prelitoral adquieren peso sobre los promedios pluviométricos en los extremos de precipitación.

REFERENCIAS

Barnolas, M., Prohom, M., Serra, A., Martín-Vide, J. (2023). Atles Climàtic de Catalunya 1991-2020. Termopluviometria mitjana. Nota d'Estudi, 75, Servei Meteorològic de Catalunya, 46 p., https://doi:10.13140/RG.2.2.23173.12007

Martin-Vide, J., Lopez-Bustins, J.A., Lemus, M., Moreno-Garcia, M.C., Balagué, X., Gonzalez-Hidago, J.C., Begueria, S., Peña-Angulo, D. & Trullenque, V. (2022). The consecutive disparity of precipitation in conterminous Spain. Theor Appl Climatol., 147, 1151–1161, https://doi.org/10.1007/s00704-021-03877-6

METEOROLOGICAL DRIVERS OF EXTREME WILDFIRES IN 2025 SEASON IN CASTILE AND LEÓN

Alejandro CORBEA-PÉREZ[1], Eduardo GARCÍA-ORTEGA[1], Andrés NAVARRO[1], Tomàs CARDONA-SASTRE[1], José Manuel FERNÁNDEZ-GUISURAGA[2] y Andrés MERINO[1]

[1]*Grupo de Física de la Atmósfera (GFA). Instituto de Medio Ambiente y Cambio Global. Universidad de León*
[2]*Grupo de Ecología Aplicada y Teledetección (GEAT). Instituto de Medio Ambiente y Cambio Global. Universidad de León*

acorp@unileon.es; eduardo.garcia@unileon.es; andres.navarro@unileon.es; tcars@unileon.es; jofeg@unileon.es; andres.merino@unileon.es

ABSTRACT

The 2025 wildfire season in the northwestern Iberian Peninsula, specially in Castile and León, occurred under extreme meteorological conditions. Understanding the resulting landscape flammability requires a characterisation of antecedent conditions, particularly the seasonal evolution during spring and summer that progressively reduced fuel moisture content. This study addresses the precursor environmental factors, analysing how hydroclimatic anomalies created a predisposition for fire, conditioning vegetation for ignition and propagation before the critical episodes occurred. To quantify these dynamics, the study utilised ERA5 reanalysis data to process surface variables: soil moisture, 2-metre temperature, relative humidity, and vapour pressure deficit (VPD). The latter is highlighted as a critical metric for quantifying atmospheric evaporative demand and the desiccation kinetics of dead fine fuels. These variables were analysed by comparing the observed 2025 values with a climatological baseline spanning from 1990 to 2024, allowing for a statistical evaluation of deviations relative to the historical series. The analysis was conducted in two phases. First, the conditions during the months preceding the onset of the wildfires were evaluated; second, a specific analysis of the meteorological dynamics during the days when the major wildfires ignited was conducted, primarily during the second dekad of August. The results demonstrate an early warning signal in June, followed by a peak in August, where positive VPD and temperature anomalies coincided with negative deviations in soil and relative humidity. In addition, atmospheric instability and the presence of strong winds on the days of ignition favoured the explosive spread of the wildfires. This analysis aims to identify seasonal atmospheric patterns and the specific conditions during event days in order to improve risk assessment.

Key words: Wildfires, Castile and León, Vapour pressure deficit, Hydroclimatic anomalies, Fuel moisture content.

INTRODUCTION

The 2025 wildfire season in Castile and León, within the northwestern Iberian Peninsula, was marked by meteorological exceptionality that favoured extreme fire behaviour. To understand this process, it is necessary to characterise the antecedent conditions, specifically the seasonal evolution during spring and summer, periods during which a progressive decline in fuel moisture content occurs (Sousa et al., 2015). This preconditioning, derived from hydroclimatic anomalies, predisposes vegetation to both ignition and fire propagation long before critical episodes occur (Gouveia et al., 2016; Turco et al., 2019). Within this process, Vapour Pressure Deficit (VPD) emerges as a fundamental metric to quantify the atmospheric evaporative demand and the drying kinetics of dead fine fuels, factors that redefine fire danger in Southern Europe (Michael et al., 2021; Rodrigues et al., 2023). In this context, the analysis of thermal and hydric anomalies, including air temperature (T2m), relative humidity (RH), soil moisture (SM) and VPD, relative to the 1990–2024 climatology is essential to identify the hydroclimatic conditions associated with enhanced wildfire susceptibility (San-miguel-ayanz et al., 2013).

The present study addresses these precursor environmental factors by examining how hydroclimatic anomalies contributed to landscape preconditioning before the most severe wildfire episodes of 2025. To this end, the study statistically evaluates the deviations of 2025 relative to the 1990–2024 climatology, differentiating seasonal preconditioning signals from the event-scale atmospheric conditions observed during the days of high wildfire activity. This analysis provides an integrated assessment of how antecedent moisture conditions, summer atmospheric drought and atmospheric instability may have combined to increase fire hazard.

METHODS

The analysis is structured into two complementary phases: the preconditioning phase, which quantifies the degree of deviation relative to historical variability and defines the conducive conditions created by the cumulative water deficit; and the event phase, which entails a synoptic analysis of days with high wildfire activity. Within this latter phase, vertical thermal gradients between 850–500 hPa and 850–700 hPa are used to diagnose tropospheric instability and boundary-layer mixing potentially favourable to extreme fire behaviour.

Area and period of study

The analysis focuses on Castile and León, located in the northwestern Iberian Peninsula, a region characterised by a complex bioclimatic transition and high fire recurrence. For the meteorological characterisation, data from the ERA5 reanalysis were utilised (Hersbach et al., 2023). The study period encompasses the 2025 season, utilising the 1990–2024 historical record for the calculation of anomalies.

Variables

Four variables were processed to characterise hydroclimatic controls on fuel availability and desiccation:

- 2-metre Air Temperature (T2m)
- Relative Humidity (RH).
- Soil Moisture as an indicator of vegetation water stress (SM).
- Vapour Pressure Deficit (VPD): is employed as the primary proxy for atmospheric evaporative demand and the drying kinetics of dead fine fuels (Michael et al., 2021).

Furthermore, to diagnose convective propagation capacity and pyrocumulus development, the vertical structure of the atmosphere was analysed using the vertical thermal gradient (Γ), calculated for two levels of the lower and middle troposphere: 850-700 for boundary layer and low-level instability, and 850-500 to assess the predisposition of the atmospheric column to deep convection development (Di Virgilio et al., 2019).

RESULTS Y DISCUSSION

Seasonal Evolution and Fuel Predisposition

The results of the statistical analysis relative to the 1990–2024 climatology indicate that the exceptional nature of the 2025 fire season in Castile and León was associated with a marked landscape preconditioning pattern (Figure 1). During the initial phase of the year, particularly between February and May, positive SM and RH anomalies were recorded. The wettest conditions occurred in March, when RH reached an anomaly of 10.69% and SM peaked at 0.063, coinciding with a negative T2m anomaly of −2.03 °C and the lowest VPD anomaly of the period, −0.207 kPa. Positive SM anomalies persisted in April and May (0.050 and 0.052, respectively), suggesting sustained spring moisture availability. These high-moisture conditions favour vegetation growth, which can increase the load and continuity of fine fuels in the Iberian northwest.

From June 2025 onwards, a transition towards warmer and drier conditions occurred, marked by a shift towards negative SM anomalies and a sharp increase in atmospheric evaporative demand. June exhibited the strongest positive T2m anomaly of the analysed period (4.09 °C), together with a decline in RH (−3.16%), negative SM anomaly (−0.011) and a pronounced increase in VPD (0.502 kPa), signalling the onset of summer water stress. Although July presented less extreme atmospheric conditions, August exacerbated the water deficit, as the lowest SM anomaly (−0.026) coincided with a strong positive T2m anomaly (3.07 °C), the greatest negative RH anomaly (−5.81%) and the maximum VPD anomaly (0.615 kPa). This configuration suggests a progressive and accelerated desiccation of the biomass accumulated during spring, increasing landscape susceptibility and its flammability potential.

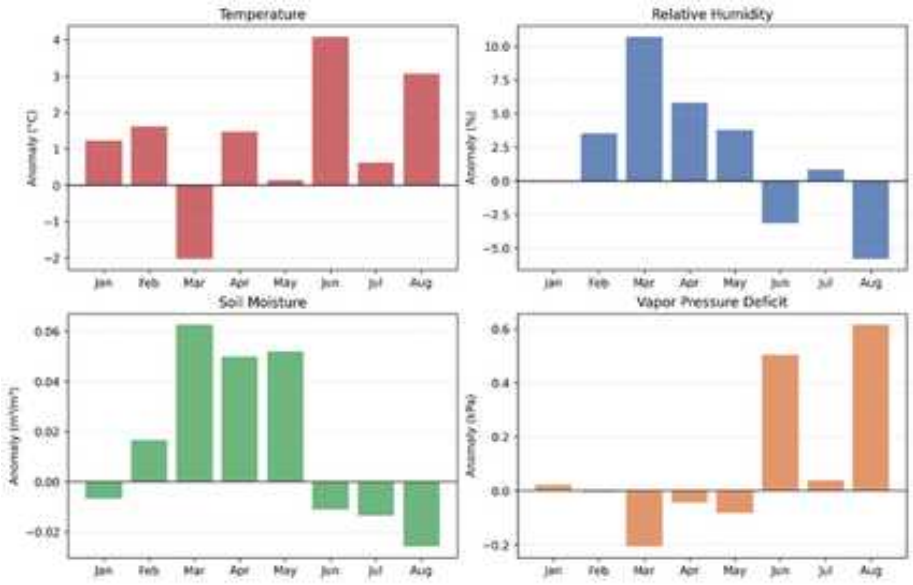


Figure 1. Mean monthly anomalies from January to August for Castile and León in 2025 relative to the 1990–2024 climatology.

Meteorological Dynamics on the Days of Ignition

While the seasonal evolution of SM and RH explains fuel availability and receptivity, the event-scale atmospheric conditions during the days of high wildfire activity were favourable to extreme fire behaviour (Rodrigues et al., 2023). During the second ten-day period of August 2025, the Iberian Peninsula was affected by an environment of pronounced atmospheric instability, consistent with conditions previously associated with large wildfires in Southern Europe (Rodrigues et al., 2023; Sousa et al., 2015). The indicates instability through the lower and middle troposphere, favouring the buoyant ascent of air parcels and increasing the potential for deep convection and pyroconvective development (Di Virgilio et al., 2019). At the same time, the suggests enhanced instability within the atmospheric boundary layer, promoting efficient vertical mixing and potentially variable near-surface winds (Dowdy et al., 2017). The concurrence of this instability with strong horizontal flow during the ignition days likely amplified fire spread by favouring turbulent mixing and long-range spotting, particularly over landscapes already affected by dry fine fuels (Michael et al., 2021).

Overall, these results characterise the 2025 fire season as the outcome of a compound hydroclimatic sequence: spring moisture can promote biomass accumulation, whereas summer warming, declining soil moisture, reduced relative humidity and increased VPD rapidly enhance fuel desiccation and fine-fuel flammability. This sequence is consistent with mechanisms described for large wildfires in Southern Europe and, in particular, the north-western Iberian Peninsula, where high temperatures, reduced summer moisture

availability and enhanced evaporative demand can extend fire danger windows, increase fuel aridity and favour the occurrence of extreme fire behaviour (Fernández-Guisuraga et al., 2023; Jones et al., 2022; Michael et al., 2021; Rodrigues et al., 2023; San-miguel-ayanz et al., 2013). As this study represents an initial assessment focused on large-scale atmospheric forcing, it does not explicitly incorporate high-resolution information on land use, topography or anthropogenic ignition factors.

CONCLUSIONS

The exceptional nature of the 2025 fire season in the Iberian northwest did not derive from a prolonged structural drought, but rather from the coupling of three critical factors: vegetation preconditioning, ecohydrological stress, and synoptic forcing. At the surface, the reduction in soil water reserves coincided in August with minimum relative humidity values. This scenario desiccated both dead fuel and live vegetation, increasing ignition danger and propagation capacity. In the upper atmospheric levels, vertical thermal gradients generated an environment of pronounced instability. This dynamic provided the vertical forcing necessary to trigger extreme fire behaviour, facilitating pyroconvection and the generation of spot fires.

ACKNOWLEDGMENTS

This research was funded by projects LE035P24 (Junta de Castilla y León), PID2022-138298OB-C21 y PID2022-138298OB-C22, with support from the MCIN/AEI.

REFERENCES

Di Virgilio, G., Evans, J. P., Blake, S. A. P., Armstrong, M., Dowdy, A. J., Sharples, J., & McRae, R. (2019). Climate Change Increases the Potential for Extreme Wildfires. *Geophysical Research Letters*, *46*(14), 8517–8526. https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2019GL083699

Dowdy, A. J., Fromm, M. D., & McCarthy, N. (2017). Pyrocumulonimbus lightning and fire ignition on Black Saturday in southeast Australia. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *122*(14), 7342–7354. https://doi.org/https://doi.org/10.1002/2017JD026577

Fernández-Guisuraga, J. M., Martins, S., & Fernandes, P. M. (2023). Characterization of biophysical contexts leading to severe wildfires in Portugal and their environmental controls. *Science of the Total Environment*, *875*, 162575. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162575

Gouveia, C. M., Bistinas, I., Liberato, M. L. R., Bastos, A., Koutsias, N., & Trigo, R. (2016). The outstanding synergy between drought, heatwaves and fuel on the 2007 Southern Greece exceptional fire season. *Agricultural and Forest Meteorology*, *218–219*, 135–145. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.11.023

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Rozum, I., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Dee, D., & Thépaut, J.-N. (2023). *ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present*. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). https://doi.org/10.24381/cds.adbb2d47

Jones, M. W., Abatzoglou, J. T., Veraverbeke, S., Andela, N., Lasslop, G., Forkel, M., Smith, A. J. P., Burton, C., Betts, R. A., van der Werf, G. R., Sitch, S., Canadell, J. G., Santín, C., Kolden, C., Doerr, S. H., & Le Quéré, C. (2022). Global and Regional Trends and Drivers of Fire Under Climate Change. *Reviews of Geophysics*, *60*(3), 1–76. https://doi.org/10.1029/2020RG000726

Michael, Y., Helman, D., Glickman, O., Gabay, D., Brenner, S., & Lensky, I. M. (2021). Forecasting fire risk with machine learning and dynamic information derived from satellite vegetation index time-series. *Science of the Total Environment*, *764*, 142844. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142844

Rodrigues, M., Cunill, À., Balaguer-romano, R., & Coco, C. J. (2023). Drivers and implications of the extreme 2022 wild fi re season in Southwest Europe. *Science of the Total Environment*, *859*(November 2022), 160320. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160320

San-miguel-ayanz, J., Moreno, J. M., & Camia, A. (2013). Analysis of large fires in European Mediterranean landscapes : Lessons learned and perspectives. *Forest Ecology and Management*, *294*, 11–22. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.10.050

Sousa, P. M., Trigo, R. M., Pereira, M. G., Bedia, J., & Gutiérrez, J. M. (2015). Different approaches to model future burnt area in the Iberian Peninsula. *Agricultural and Forest Meteorology*, *202*, 11–25. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.11.018

Turco, M., Jerez, S., Augusto, S., Tarín-Carrasco, P., Ratola, N., Jiménez-Guerrero, P., & Trigo, R. M. (2019). Climate drivers of the 2017 devastating fires in Portugal. *Scientific Reports*, *9*(1), 13886. https://doi.org/10.1038/s41598-019-50281-2

DÉFICIT EVAPORATIVO Y OLAS DE CALOR EN CIUDADES ANDALUZAS: IMPLICACIONES PARA LA PRESIÓN HÍDRICA

Paula SERRANO-ACEBEDO, Natalia LIMONES y Mónica AGUILAR-ALBA

Departamento de Geografía Física y Análisis Geográfico Regional. Universidad de Sevilla.

pserrano1@us.es, natalialr@us.es, malba@us.es

RESUMEN

En Andalucía, el análisis de la presión hídrica sobre los recursos presenta una especial relevancia en un contexto de calentamiento, aumento de la demanda evaporativa y mayor escasez. Esta comunicación evalúa si los episodios generalizados de ola de calor definidos por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) intensifican la evaporación de lámina libre durante los meses de julio y agosto, tomando como referencia las capitales de provincia andaluzas y Jerez de la Frontera. El objetivo es cuantificar el incremento de las pérdidas evaporativas durante estos episodios respecto a los valores medios, así como analizar sus diferencias temporales y espaciales dentro de la región. El análisis realizado estima el déficit evaporativo mensual mediante un balance entre precipitación y evaporación de lámina libre de agua, calculada con la formulación de Penman a partir de ERA5-Land diario para el periodo 1980-2025. Los valores se expresan en mm o l/m², y en una fase posterior a este estudio se realizará su conversión a volúmenes de reposición mediante la superficie real de piscinas. Los resultados identifican importantes diferencias entre el déficit de julio y agosto tanto espacial como temporalmente con importantes incrementos en los episodios de olas de calor. Estos resultados permiten identificar los ámbitos en los que el calor extremo puede incrementar la presión hídrica potencial asociada a las necesidades de reposición de agua en piscinas en Andalucía.

Palabras clave: Andalucía, piscinas, gestión del agua, estrés hídrico, olas de calor, déficit evaporativo.

ABSTRACT

In Andalusia, the analysis of water pressure on water resources is particularly relevant in a context of warming, increasing evaporative demand and growing scarcity. This paper evaluates whether widespread heatwave episodes defined by the Spanish Meteorological Agency (AEMET) intensify open-water evaporation during July and August, taking the Andalusian provincial capitals and Jerez de la Frontera as reference areas. The aim is to quantify the increase in evaporative losses during these episodes

in relation to mean conditions, as well as to analyse their temporal and spatial differences within the region. As a first approximation, monthly evaporative deficit is estimated through a balance between precipitation and open-water evaporation, calculated using the Penman formulation from daily ERA5-Land data for the period 1980–2025. Values are expressed in mm or l/m², prior to their subsequent conversion in future stages of the project into refilling volumes using the actual surface area of swimming pools. The results identify important spatial and temporal differences between July and August with outstanding increases observed during heatwave episodes. Overall, these findings make it possible to identify the areas where extreme heat may increase the potential water pressure associated with swimming-pool refilling needs in Andalusia.

Keywords: Andalusia, swimming pools, water stress, water management, heatwaves, evaporative deficit.

INTRODUCCIÓN

El cambio climático está intensificando en Andalucía dos procesos estrechamente relacionados: el aumento del calor extremo y la creciente presión sobre unos recursos hídricos limitados. En el ámbito mediterráneo, el calentamiento observado desde la década de 1980 supera la media global, mientras que los extremos térmicos y las olas de calor han aumentado en intensidad, frecuencia y duración (AEMET, 2024a). De forma paralela, el incremento de la demanda evaporativa atmosférica y la mayor severidad, frecuencia y duración de los episodios de sequía refuerzan los problemas de disponibilidad y gestión del agua (IPCC, 2022; AEMET, 2025).

En este contexto, las piscinas constituyen un elemento relevante para analizar la relación entre clima, demanda de agua y territorio. Su mantenimiento implica consumos asociados al llenado inicial y, especialmente, a la reposición de las pérdidas por evaporación, por lo que su presión potencial sobre los recursos no depende únicamente del número de instalaciones, sino también de su superficie de lámina libre, su localización y las condiciones climáticas en las que se insertan (Limones et al., 2026). La consideración de episodios de ola de calor resulta particularmente pertinente, ya que estos eventos pueden intensificar de forma puntual la evaporación y, con ello, incrementar las necesidades potenciales de reposición en periodos de elevada presión sobre los recursos hídricos.

Esta comunicación se centra en la caracterización del déficit evaporativo durante los meses de julio y agosto en las principales ciudades andaluzas, con el fin de evaluar si los episodios generalizados de ola de calor se asocian con incrementos significativos de la evaporación de lámina libre. El análisis se plantea como una primera aproximación climática, expresada en mm o L/m², previa a la conversión del déficit en

volúmenes de reposición mediante la superficie real de piscinas. Este enfoque permite identificar diferencias temporales y espaciales en la respuesta evaporativa ante el calor extremo, aportando una base para posteriores análisis sobre presión hídrica, abastecimiento y vulnerabilidad urbana.

OBJETIVOS

El objetivo principal de este estudio es determinar si los episodios generalizados de ola de calor producen una intensificación significativa de la evaporación de lámina libre en las principales ciudades andaluzas durante los meses de julio y agosto. Este análisis se plantea como una primera aproximación para valorar la incidencia del calor extremo sobre el déficit evaporativo y su posible repercusión en la presión hídrica potencial asociado a la reposición de agua en piscinas.

Para ello, se calcula el déficit evaporativo mensual a partir del balance entre evaporación de lámina libre y precipitación, empleando datos diarios de ERA5-Land para el periodo 1980–2025. A continuación, se comparan los valores medios del periodo de referencia con los correspondientes a meses afectados por olas de calor, con el fin de identificar diferencias entre julio y agosto y caracterizar su expresión espacial en las capitales andaluzas representando a las tres demarcaciones hidrográficas (Guadiana, Guadalquivir y Sur) y Jerez de la Frontera que representaría a la demarcación hidrográfica del Guadalete-Barbate.

METODOLOGÍA

El análisis se desarrolla a escala urbano-municipal y considera las ocho capitales provinciales andaluzas, junto con Jerez de la Frontera, como unidades espaciales de referencia.

En primer lugar, se estimó el déficit evaporativo mensual, entendido como la diferencia entre la evaporación de lámina libre y la precipitación acumulada. Para el periodo histórico se utilizó ERA5-Land diario de 1980 a 2025 (Muñoz-Sabater et al., 2021). La evaporación de lámina libre se calculó mediante la formulación de Penman, que combina un término energético, asociado a la radiación neta, y un término aerodinámico, dependiente del viento y del déficit de presión de vapor.

presión y viento procedentes de ERA5-Land. El déficit evaporativo se expresa como E-P, en mm o L/m², donde valores más altos indican una mayor demanda evaporativa no compensada por la precipitación. Se seleccionaron únicamente los meses de julio y agosto por concentrar los mayores valores estivales de demanda evaporativa y coincidir con el periodo principal de ocurrencia de olas de calor.

Asimismo, el análisis incorpora de forma específica la dimensión episódica del calor extremo, lo que permite examinar hasta qué punto las olas de calor pueden intensificar el déficit evaporativo. Los episodios de ola de calor se seleccionaron a partir del listado de provincias afectadas por olas de calor publicado por AEMET desde 1975 (AEMET, 2024b); de acuerdo con AEMET, una ola de calor se define como un episodio de al menos tres días consecutivos en el que, como mínimo, el 10 % de las estaciones consideradas registran temperaturas máximas superiores al percentil 95 de su serie diaria del periodo de referencia 1971-2000.

Se consideraron aquellos episodios con amplio alcance regional, definidos en este trabajo como los que afectaron a siete u ocho provincias andaluzas durante julio o agosto. La comparación se realizó de forma separada para cada mes, con el fin de evitar que la señal de un episodio concentrado en julio o en agosto quedara suavizada al agregar ambos meses. Este planteamiento puede integrarse en enfoques de narrativas climáticas o storylines, en los que episodios observados recientes se utilizan como situaciones plausibles para explorar condiciones que podrían hacerse más frecuentes en un clima más cálido (Shepherd et al., 2018).

Con las series promedio de todas las ciudades en julio y agosto se realizó un análisis de las tendencias para evaluar el comportamiento y los incrementos experimentados durante el periodo 1980-2025. Las olas de calor fueron identificadas en este periodo de referencia según los criterios de Aemet pero sin distinción de su duración o intensidad. Posteriormente se ha calculado la diferencia entre el déficit medio en cada ciudad y el déficit de los meses de olas de calor estimando el incremento relativo de la demanda evaporativa en eventos extremos. Finalmente, se representaron espacialmente las diferencias obtenidas por ciudades en julio y agosto, para conservar el detalle territorial de la estimación y valorar si la intensificación del déficit durante olas de calor presenta contrastes espaciales.

RESULTADOS PRELIMINARES Y DISCUSIÓN

La evolución del déficit evaporativo medio entre 1980 y 2025 muestra una tendencia general al aumento, coherente con el incremento de la demanda evaporativa en un contexto de calentamiento regional (Figura 1). Las tendencias estimadas en las rectas de regresión discontinuas indica un incremento estadísticamente significativo del déficit estival durante el periodo analizado ($p < 0{,}001$), lo que apunta a una intensificación sostenida de las condiciones evaporativas en los meses de máxima demanda.

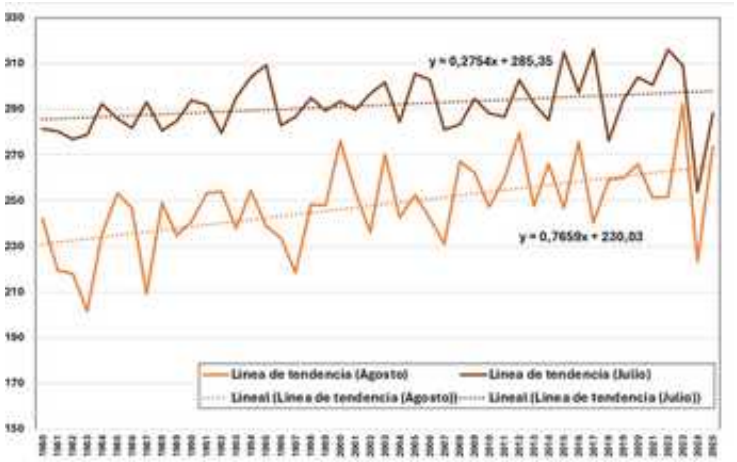


Figura 1. Evolución del déficit medio evaporativo (mm) en julio y agosto en Andalucía (1980-2025).

Se observan contrastes relevantes entre julio y agosto, tanto en la magnitud media del déficit como en su evolución temporal. Julio presenta valores aproximadamente 60 mm superiores a los de agosto, confirmando su papel como el mes de mayor demanda evaporativa media. No obstante, la tendencia temporal revela comportamientos diferenciados: mientras que julio registra una pendiente positiva de 0,27 mm/año, estadísticamente significativa ($p < 0,05$), agosto alcanza una tasa de incremento de 0,76 mm/año. Este mayor ritmo de aumento apunta a una intensificación más acusada del déficit evaporativo al final del verano, de tal forma que agosto tiende progresivamente a aproximarse a los niveles de déficit característicos de julio. Este comportamiento sugiere que las necesidades potenciales de reposición en piscinas podrían intensificarse de forma creciente al final del verano, especialmente si los episodios de calor extremo coinciden con valores elevados de déficit evaporativo en agosto.

Los años identificado con olas de calor no coinciden en su totalidad entre julio (1995, 2018, 2022, 2023 y 2025) y agosto (2012, 2021, 2023 y 2025) y presentan una respuesta diferenciada entre años, meses y ciudades. El déficit se expresa como la diferencia porcentual respecto al promedio de referencia 1980–2025 (Figura 2), siendo el tamaño de los círculos proporcional a la diferencia y el sentido de la anomalía se indica por el color. El azul indica un déficit hídrico menor que el promedio histórico, es decir, aquellos lugares que, aun experimentando la región un episodio generalizado de ola de calor en la región, su déficit es menor al promedio de referencia. Por el contrario, las anomalías positivas se muestran en rojo y corresponden con los lugares donde el estrés hídrico en el episodio extremo supera el valor base de referencia. Los episodios seleccionados no presentan una distribución territorial uniforme: algunos años muestran una afección más localizada en el interior, como 1995 en el entorno de

Córdoba y Sevilla, mientras que otros reflejan una señal más marcada en sectores occidentales u orientales, como ocurre en 2018 y 2022. En los años más recientes, especialmente 2023 y 2025, los episodios presentan un alcance regional más amplio y se asocian con déficits elevados tanto en ciudades interiores como litorales.

La diferenciación mensual resulta especialmente significativa atendiendo a estas diferencias entre ciudades; en julio, los incrementos relativos son más moderados, pero en agosto la señal se intensifica y aparecen contrastes espaciales más acusados, con incrementos destacados en Granada, Jaén, Córdoba, Huelva y Málaga. Sevilla constituye un caso particular, ya que parte de valores medios de referencia elevados y, por tanto, el incremento porcentual durante los episodios de ola de calor resulta menos acusado que en ciudades donde el déficit medio es menor, como Granada o Jaén.

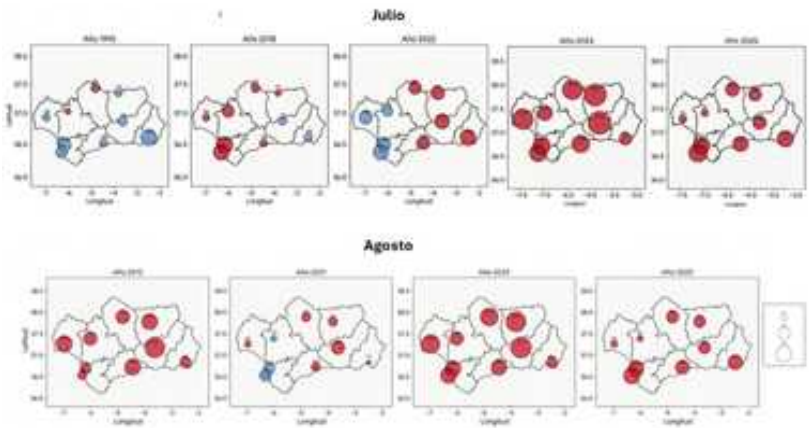


Figura 2. Incremento porcentual del déficit evaporativo en años de olas de calor respecto al periodo de referencia 1980-2025. El azul indica un déficit negativo, inferior al promedio y rojo anomalía positiva.

Este patrón pone de manifiesto que la respuesta evaporativa ante las olas de calor no es homogénea espacial ni temporalmente. La agregación de julio y agosto puede atenuar señales mensuales relevantes, especialmente cuando los episodios cálidos se concentran en uno de los dos meses. Por ello, el análisis mensual permite identificar con mayor precisión dónde y cuándo se intensifica la demanda evaporativa, evitando interpretaciones excesivamente agregadas que podrían ocultar diferencias territoriales importantes para la posterior estimación de la presión hídrica asociada a superficies de lámina libre.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos evidencian que los episodios de ola de calor se asocian con una intensificación del déficit evaporativo en las principales ciudades andaluzas, si bien dicha intensificación presenta una marcada heterogeneidad espacial y temporal. La respuesta no es uniforme entre ciudades ni entre meses, siendo especialmente destacable el comportamiento de agosto, que muestra una señal más intensa que julio durante los episodios analizados. Este resultado pone de manifiesto la conveniencia de abordar ambos meses de forma diferenciada.

La evolución temporal del déficit evaporativo muestra, además, un incremento sostenido durante el periodo 1980–2025, coherente con el aumento de la demanda evaporativa en un contexto de calentamiento regional. Aunque julio mantiene valores medios superiores, agosto presenta una tasa de incremento más elevada, lo que sugiere una progresiva intensificación de las condiciones de déficit al final del verano. En este marco, el año 2023 destaca como uno de los episodios más relevantes de la serie al registrar anomalías positivas en ambos meses y en un contexto reciente ya caracterizado por condiciones térmicas más cálidas. La variabilidad observada entre ciudades confirma la necesidad de incorporar la dimensión episódica y espacial del calor extremo en la evaluación de la demanda evaporativa, especialmente cuando esta se plantea como indicador preliminar de las necesidades potenciales de reposición en superficies de lámina libre, como las piscinas.

En conjunto, esta aproximación permite avanzar en la estimación de la presión potencial sobre los recursos hídricos en los núcleos urbanos. En fases posteriores, el análisis se va a completar mediante la incorporación de atributos específicos de las olas de calor, como intensidad, duración y persistencia, con conversión del déficit en volúmenes potenciales de reposición a partir de la superficie real de las piscinas. Finalmente se integrará la demanda asociada a piscinas con las unidades efectivas de abastecimiento, la demanda urbana oficial, los recursos disponibles y los índices de explotación.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo ha sido financiado por el I+D+i. Proyecto: Integración espacial y geovisualización de datos asociados a piscinas para la generación de indicadores de presión hídrica y vulnerabilidad al cambio climático en Andalucía (PID2023-151346NB-I00). Plan Estatal 2021-2023. Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades. Gobierno de España.

REFERENCIAS

Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) (2024a). Olas de calor en España desde 1975, Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico https://www.aemet.es/es/conocermas/recursos_en_linea/publicaciones_y_estudios/estudios/detalles/olascalor

Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) (2024b). Listado de provincias afectadas por las Olas de Calor registradas desde 1975, Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, https://www.aemet.es/es/conocermas/recursos_en_linea/publicaciones_y_estudios/estudios/detalles/olascalor

Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) (2025). *Informe sobre el estado del clima de España 2024*. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability., Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press.

Limones, N., Serrano-Acebedo, P., Sánchez-Rodríguez, E., García-Martínez, B., Aguilar-Alba, M., & Ojeda-Zújar, J. (2026, marzo 14). Swimming pools as dual urban infrastructures: Water resources pressure and heat-risk modulation under climate change in a Mediterranean context. *EGUsphere*, https://doi.org/10.5194/egusphere-egu26-15127

Muñoz-Sabater, J., Dutra, E., Agustí-Panareda, A., Albergel, C., Arduini, G., Balsamo, G., Boussetta, S., Choulga, M., Harrigan, S., Hersbach, H., Martí, P., Muñoz, A., Peubey, C., Rosnay, P. de, Rodríguez-Fernández, N. J., Zsoter, E., Buontempo, C. & Thépaut, J.N. (2021). ERA5-Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth System Science Data*, 13, 4349-4383. https://doi.org/10.5194/essd-13-4349-2021

Shepherd, T. G., Boyd, E., Calel, R. A., Chapman, S. C., Dessai, S., Dutra, E., Inman, M., Gill, P., Mitchell, J. F. B., & Pidgeon, N. (2018). Storylines: An alternative approach to representing uncertainty in physical aspects of climate change. Climatic Change, 151(3–4), 555–571. https://doi.org/10.1007/s10584-018-2317-9

LOS EPISODIOS DE CALOR EXTREMO EN ASTURIAS ENTRE 2001 Y 2025: CONFIGURACIONES ATMOSFÉRICAS RESPONSABLES

Luis PÉREZ-GARCÍA[1], Cristina GARCÍA-HERNÁNDEZ[1], Jesús RUIZ-FERNÁNDEZ[1], Laura NÚÑEZ DE CON[1]

[1]*Universidad de Oviedo*

perezgluis@uniovi.es, garciahcristina@uniovi.es *, uizjesus@uniovi.com, uo294767@uniovi.es*

RESUMEN

Las olas de calor constituyen fenómenos extremos con graves impactos en regiones poco habituadas al calor, como Asturias. Este estudio presenta una caracterización sinóptica de los 13 episodios de ola de calor registrados en Asturias entre 2001 y 2025. A partir de datos de reanálisis ERA5 (temperatura a 850 hPa y altura geopotencial en 500 hPa), se elaboraron campos compuestos para cada episodio. Sobre ellos se aplicó un análisis de conglomerados jerárquico (métrica euclídea, método de Ward) que identificó tres patrones sinópticos dominantes. Se calcularon las anomalías respecto al período de referencia 1991-2020. El Tipo 1 refleja advecciones saharianas intensas con marcada circulación meridiana, responsable de los eventos más extremos (anomalía de T850 de hasta +8,5 °C). El Tipo 2 combina advección continental moderada y dorsal ibérica. El Tipo 3, el más frecuente, se asocia a situaciones de pantano barométrico con estabilidad y subsidencia. La anomalía media del conjunto de episodios alcanza +6,4 °C para T850 y +133 m para Z500. Se confirma que la advección cálida y la estabilidad son los mecanismos principales, y que los patrones más excepcionales, hoy infrecuentes, podrían incrementarse en un contexto de cambio en la circulación general.

Palabras clave: olas de calor, clasificación sinóptica, advección, Asturias.

ABSTRACT

Heat waves are extreme phenomena with severe impacts in regions historically unaccustomed to high temperatures, such as Asturias. This study presents a synoptic characterization of the 13 heat wave episodes recorded in Asturias between 2001 and 2025. Using ERA5 reanalysis data (850 hPa temperature and 500 hPa geopotential height), composite fields were constructed for each episode. A hierarchical cluster analysis (Euclidean distance, Ward's method) was applied, identifying three dominant synoptic patterns. Anomalies were computed with respect to the 1991–2020 reference period. Type 1 features intense Saharan advection with marked meridional flow, driving the most extreme episodes (T850 anomaly up to +8.5 °C). Type 2 combines

moderate continental advection with an Iberian ridge. Type 3, the most frequent pattern, is linked to barometric swamp conditions dominated by stability and subsidence. The mean anomaly across all episodes reached +6.4 °C for T850 and +133 m for Z500. The results confirm warm advection and atmospheric stability as the primary driving mechanisms, while the rarest, most exceptional patterns may become more frequent due to changes in large-scale atmospheric circulation.

Key words: heat waves, synoptic classification, advection, Asturias.

INTRODUCCIÓN

Las olas de calor son fenómenos atmosféricos extremos con grandes impactos sobre la salud humana, las actividades económicas y el medio ambiente (Conlon et al., 2020). Los efectos adversos, combinados con el incremento reciente de su frecuencia e intensidad en un contexto de cambio climático, y las proyecciones de empeoramiento en el futuro, hacen necesarios este tipo de trabajos en España (por ejemplo, Serrano-Notivoli et al., 2022) para profundizar en su estudio sinóptico, y reducir los riesgos para la población. En Asturias hay una laguna de conocimiento ante la escasa incidencia histórica del fenómeno. El objetivo principal de la comunicación es caracterizar las olas de calor sucedidas en Asturias entre 2001 y 2025 desde el punto de vista sinóptico. Los objetivos específicos son: agrupar las situaciones atmosféricas por patrones comunes y calcular anomalías con respecto a los valores climáticos normales (1991-2020). La hipótesis es que las principales responsables del calor extremo en Asturias son las advecciones cálidas y la estabilidad atmosférica.

METODOLOGÍA

La selección de los 13 episodios de ola de calor en Asturias (2001-2025) se basa en un trabajo previo (Pérez-García et al., 2025) según los criterios oficiales de AEMET: superación del percentil 95 de las temperaturas máximas de julio y agosto (1971-2000) durante al menos tres días consecutivos en un mínimo del 10% de las estaciones. La caracterización sinóptica emplea datos de reanálisis ERA5 (ECMWF), utilizando la temperatura a 850 hPa (T850) como indicador de la masa de aire y la altura geopotencial en 500 hPa (Z500) para diagnosticar la circulación en niveles medios, sobre un dominio de 30°N-60°N y 20°W-20°E. El procesamiento se realizó en R 4.5.1. Para cada episodio se calculó el promedio de los campos de T850 y Z500, obteniendo un mapa compuesto representativo. Sobre estos 13 composites se aplicó un análisis de conglomerados jerárquico, empleando exclusivamente los valores de T850, con distancia euclídea y método de Ward. La inspección del dendrograma y la coherencia física de los patrones determinó una solución de tres tipologías sinópticas. Las anomalías regionales se calcularon respecto al período 1991-2020. Finalmente, se elaboraron mapas de la situación atmosférica y las anomalías para cada grupo.

RESULTADOS

Clasificación jerárquica de los episodios

La aplicación del análisis de conglomerados sobre los 13 episodios de temperatura extrema ha dado como resultado la diferenciación de tres tipologías sinópticas principales. Tal como se detalla en el dendrograma (figura 1), la muestra se organiza en una estructura ramificada donde destaca, en primer lugar, una partición primaria que segrega el Tipo 1 (compuesto por dos episodios) del resto de la muestra. Esta distinción inicial se produce a una distancia euclídea superior, marcando la mayor divergencia térmica en el nivel de 850 hPa dentro del conjunto de datos analizado. Los episodios restantes se agrupan en una segunda rama que se subdivide, a su vez, en dos categorías denominadas Tipo 2 (que incluye cuatro episodios) y Tipo 3. Aunque estos dos grupos presentan una mayor proximidad relativa entre sí, el umbral de corte definido por el método de Ward permite tratarlos como configuraciones independientes.

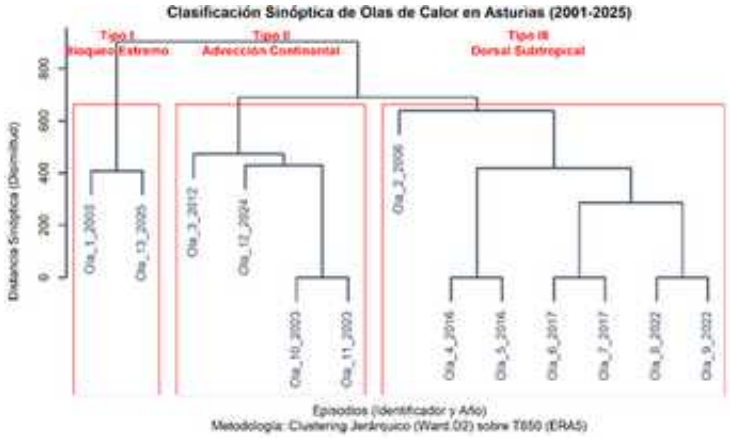


Figura 1: dendrograma de clasificación jerárquica de las olas de calor en tres tipologías. Fuente: elaboración propia a partir de datos del reanálisis ERA5.

Patrones atmosféricos responsables de las olas de calor en Asturias

A partir de la clasificación en clusters se han identificado tres patrones sinópticos claves como responsables de las olas de calor en Asturias (figura 2). El tipo 1 corresponde con una advección sahariana muy amplia y potente, impulsada por un gradiente notable de geopotencial, con una profunda vaguada situada sobre el Atlántico y una potente dorsal que abarca toda la península ibérica y se extiende hacia el norte de Europa. Esa posición relativa de dorsal y vaguada propicia una circulación atmosférica meridiana que provoca la advección de una masa cálida tropical continental sobre la península, incluyendo el cantábrico, con vientos de componente sur. Las situaciones de tipo 2 combinan una advección continental de menor magnitud y extensión con la presencia de una dorsal sobre la península Ibérica. Las situaciones de tipo 3, de pantano barométrico, se caracterizan por la estabilidad atmosférica sobre

la península en todos los niveles y el escaso gradiente térmico y de altura geopotencial. En cuanto a las anomalías del período de referencia (1991-2020) para la temperatura a 850 hPa y la altura geopotencial a 500 hPa (tabla 1), se ha obtenido una anomalía media para el conjunto de episodios de 6,4ºC y 133 metros, respectivamente. Para la temperatura el rango de anomalías de las olas oscila entre 2,3ºC y 8,5ºC, y para el geopotencial entre 83 y 184 metros.

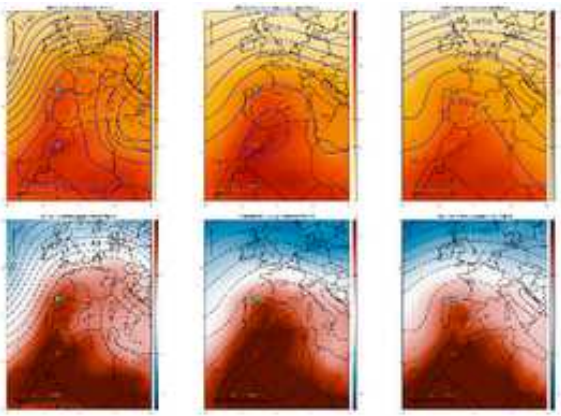


Figura 2: mapas de tipos de configuraciones atmosféricas responsables de las olas de calor. Valores absolutos de temperatura (850 hPa) y altura geopotencial (500 hPa) y anomalías con respecto al período de referencia (1991-2020). Fuente: elaboración propia a partir del reanálisis de ERA5.

Episodio	Tipo	Fecha	T850_Abs	T850_Anom	Z500_Abs	Z500_Anom
Ola_1_2003	1	3-13 Ago	23,005	8,4	5913	143
Ola_2_2006	3	4-6 Sept	21,221	8,4	5919	184
Ola_3_2012	2	8-11 Ago	19,219	4,6	5886	116
Ola_4_2016	3	17-19 Jul	16,490	2,3	5868	83
Ola_5_2016	3	5-7 Sept	16,524	3,7	5868	133
Ola_6_2017	3	18-21 Jun	18,910	6,4	5884	144
Ola_7_2017	3	20-22 Ago	18,865	4,3	5884	114
Ola_8_2022	3	15-17 Jun	20,943	8,4	5902	162
Ola_9_2022	3	9-18 Jul	20,877	6,7	5902	117
Ola_10_2023	2	8-10 Ago	21,850	7,2	5916	146
Ola_11_2023	2	22-24 Ago	21,785	7,2	5916	146
Ola_12_2024	2	28-30 Jul	20,958	6,8	5886	101
Ola_13_2025	1	14-16 Ago	23,109	8,5	5913	143

Tabla 1: valores medios de temperatura a 850hPa (ºC) y geopotencial a 500hPa (m) y anomalías respecto al período de referencia (1991-2020) para cada ola de calor. Fuente: elaboración propia a partir del reanálisis ERA5.

DISCUSIÓN

La situación más frecuente responsable de las olas de calor en Asturias es la tipo 3, si bien no es la que genera los eventos más extremos. El tipo 1 (figura 1) incluye las situaciones más anómalas, muy distanciadas del resto, que corresponden con los eventos de agosto de 2003 y de 2025. Por su parte los tipos 2 y 3 muestran más similitudes entre sí que con las de tipo 1, y se diferencian por matices, mostrando por lo general mayores anomalías positivas de temperatura las de tipo 2 y de geopotencial las de tipo 3. En las de tipo 1 el calentamiento extremo en superficie se debe a tres factores: potente advección, subsidencia anticiclónica y efecto foehn debido a los vientos de componente sur que descienden recalentados al atravesar la cordillera Cantábrica. En los otros tipos la subsidencia siempre está presente, sin embargo, la advección pierde intensidad y la situación será más o menos extrema según el gradiente (que determina la intensidad del viento de sur) y según la mayor o menor temperatura de la masa de aire en altura. En las de tipo 2 predomina la advección, mientras que en el tipo 3 el calentamiento responde principalmente a la subsidencia y estancamiento del aire. Las situaciones más excepcionales (tipo 1) suceden por una circulación meridiana del jet-stream poco frecuente en verano, pero podrían volverse más habituales si se producen cambios en la circulación general atmosférica en el contexto de cambio global (Stendel et al., 2021). La mortalidad atribuible al calor ha repuntado en Asturias en los veranos recientes coincidiendo con las olas más duraderas e intensas de 2022 y 2025 (MACE; Tobías et al., 2023).

CONCLUSIONES

El análisis sinóptico de las 13 olas de calor registradas en Asturias entre 2001 y 2025, mediante clasificación jerárquica de los campos de temperatura a 850 hPa, ha permitido identificar tres patrones atmosféricos responsables. El Tipo 1, asociado a intensas advecciones saharianas con marcada circulación meridiana, genera los episodios más extremos (anomalías de T850 de hasta +8,5 °C), potenciados por subsidencia anticiclónica y efecto foehn al cruzar la cordillera Cantábrica. El Tipo 2 combina advección continental moderada con dorsal ibérica y presenta anomalías relevantes, aunque inferiores. El Tipo 3, el más frecuente, responde a situaciones de pantano barométrico y estabilidad generalizada, donde el calentamiento deriva principalmente de subsidencia y estancamiento del aire. La anomalía media del conjunto de eventos alcanza +6,4 °C en T850 y +133 m en Z500, con notable variabilidad inter-episodios. Estos resultados confirman que la advección cálida y la estabilidad atmosférica constituyen los mecanismos dominantes, y evidencian que los eventos más anómalos, hoy infrecuentes, podrían aumentar en un contexto de cambio global. Esto pone de manifiesto la necesidad de más estudios sobre la evolución de la circulación general y sus impactos en la región.

REFERENCIAS

Conlon, K. C., Mallen, E., Gronlund, C. J., Berrocal, V. J., Larsen, L., & O'Neill, M. S. (2020). Mapping human vulnerability to extreme heat: A critical assessment of heat vulnerability indices created using principal components analysis. *Environmental health perspectives*, *128*(9), 097001.

Pérez-García, L., García-Hernández, C., & Ruiz-Fernández, J. (2025). Trends, Atmospheric Patterns, and Spatial Variability of Heatwaves in an Oceanic Climate Area of NW Iberia. *Land*, *14*(2), 310.

Serrano-Notivoli, R., Lemus-Canovas, M., Barrao, S., Sarricolea, P., Meseguer-Ruiz, O., & Tejedor, E. (2022). Heat and cold waves in mainland Spain: Origins, characteristics, and trends. *Weather and Climate Extremes*, *37*, 100471.

Stendel, M., Francis, J., White, R., Williams, P. D., & Woollings, T. (2021). The jet stream and climate change. In *Climate change* (pp. 327-357). Elsevier.

Tobías, A., Íñiguez, C., & Royé, D. (2023). From research to the development of an innovative application for monitoring heat-related mortality in Spain.

THE ROLE OF SYNOPTIC AND MESOSCALE CIRCULATION IN EXTREME DAILY RAINFALL VALUES IN THE BALEARIC ISLANDS

Miquel TOMAS-BURGUERA[1], Josep FORTESA[1], Julián GARCÍA-COMENDADOR[1], Miquel MIR-GUAL[1], Roberto SERRANO-NOTIVOLI[2], Santiago BEGUERÍA[3], Jaume COMPANY[1], Francisco CUELLO-LLOBELL[1], Alexandre MORAGUES[1], Joan ESTRANY[1]

[1]Natural Risks and Emergencies Observatory of the Balearic Islands—RiscBal; http://riscbal.uib.eu, University of the Balearic Islands. Department of Geography and Institute of Agro-Environmental & Water Economy Research—INAGEA; Centre Bit Raiguer, Inca, Mallorca – Spain
[2]Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio, Universidad de Zaragoza, Zaragoza
[3]Estación Experimental de Aula Dei, CSIC, Zaragoza

m.tomas@uib.cat

RESUMEN

Si bien los índices NAO y WeMO son factores determinantes de la precipitación mediterránea, la interacción entre los regímenes meteorológicos (WR) de la troposfera media y los tipos de tiempo (WT) de superficie ha sido menos explorada. Este estudio evalúa el valor añadido de un enfoque integrado WR-WT para caracterizar la variabilidad y los extremos de la precipitación diaria en las Islas Baleares (1971-2020), utilizando datos diarios de la estación meteorológica de Lluc (Serra de Tramuntana, AEMET), la clasificación de Jenkinson y Collison y una clasificación de regímenes meteorológicos. Los resultados preliminares indican que el régimen meteorológico de Dorsal Atlántica favorece los WT Anticiclónicos, mientras que la fase NAO− aumenta la frecuencia de los WT Ciclónicos. En cuanto a la precipitación, los regímenes de Dorsal Atlántica y Bloqueo Escandinavo potencian la eficiencia de los días lluviosos ciclónicos. Además, estos regímenes presentan un percentil 99 de precipitación más elevado en comparación con las fases NAO+ y NAO−.

Palabras clave: Regímenes meteorológicos, tipos de tiempo, NAO, precipitación extrema, Islas Baleares.

ABSTRACT

While the NAO and WeMO indices are established drivers of Mediterranean precipitation, the interaction between mid-tropospheric weather regimes (WR) and surface weather types (WT) remains less explored. This study evaluates the added value of an integrated WR–WT approach to characterize daily rainfall variability and extremes in the Balearic Islands (1971–2020), using AEMET daily data from Lluc

(B013-AEMET), a weather station located in Tramuntana Range, and the Jenkinson and Collison classification. Preliminary results indicate that Atlantic Ridge WR favours Anticyclonic WT, whereas NAO- increases the frequency of Cyclonic WTs. Regarding precipitation, Atlantic Ridge and Scandinavian Blocking WRs enhance the efficiency of cyclonic rainy days. Furthermore, these regimes exhibit a higher 99th percentile of rainfall compared to NAO+ and NAO-.

Key words: Weather Regimes, Weather Types, NAO, extreme rainfall, Balearic Islands.

INTRODUCTION

While precipitation across the European Atlantic facade is closely linked to the North Atlantic Oscillation (NAO) (Trigo et al., 2004), this relationship weakens in the Western Mediterranean, where the Western Mediterranean Oscillation (WeMO) acts as a more significant driver for both mean and extreme rainfall (Martín-Vide & López-Bustins, 2006; Beguería et al., 2025; Martín-Vide et al., 2025). This spatial contrast highlights the regional dependency of daily precipitation extremes across the Iberian Peninsula.

Beyond teleconnection indices, the Weather Regimes (WR) framework provides a more detailed classification of mid-tropospheric large-scale circulation over Europe, commonly represented by four dominant regimes: NAO+, NAO−, Scandinavian Blocking (SB), and Atlantic Ridge (AR) show a typical persistence between 6-12 days (Cassou, 2008).

Conversely, Weather Types (WT) characterize synoptic-scale circulation patterns near the surface, providing higher temporal variability. WTs are often classified via the Jenkinson and Collison (J&C) classification scheme, which has been widely applied across the Iberian Peninsula (Trigo & DaCamara, 2000; Cortesi et al., 2014) and remains a robust tool for studying extreme precipitation and hydrosedimentary response in the Balearic Islands (Grimalt-Gelabert et al., 2021; Peña-Angulo et al., 2021).

This study explores the hypothesis that the interaction between WR and WT may exhibit a stronger relationship with extreme precipitation than either classification alone. We suggest that the large-scale WR acts as a modulator, enhancing or suppressing precipitation efficiency of daily WT patterns. This framework is evaluated through a preliminary analysis at a weather station in the Serra de Tramuntana range, Mallorca.

METHODS

To conduct the analysis, both WT and WR datasets were integrated. The WT classification was previously used in Peña-Angulo et al. (2021) and it is based in the Jenkinson and Collison methodology as adapted by Trigo and DaCamara (2000). To simplify results presentation, the 26 original WTs were aggregated into 5 different groups: Pure anticyclonic (Pure A), Pure cyclonic (Pure C), advective anticyclonic (<A>), advective cyclonic (<C>), and pure advective (<adv>).

Regarding the WR classification, four distinct groups covering the 1948-2020 period were obtained from REGIMES database (http://dods.lsce.ipsl.fr/dase/REGIMES/) (Yiou et al., 2008).

Daily precipitation records for the Lluc weather station (B013) were obtained from AEMET database. To minimize the impact of missing values, the period 1971-2020 was considered. To assess the influence of WRs on precipitation, a Kruskal-Wallis test was performed to identify statistical differences between groups. Subsequently, a Dunn's test was used to determine which specific WR pairs were statistically different.

RESULTS

The analysis of WTs aggregations reveals that advective WTs are the most frequent (47.2 %), followed by Pure A (17.6 %) and <C> (12.6 %) (Table 1). By WR, the AR favors Pure A conditions, while inhibiting C conditions. In contrast, NAO- hinders Pure A occurrence while favoring cyclonic patterns. The NAO+ exhibits a WT distribution closely aligned with the global average. Finally, the SB favors both <A> and <C> types.

	Pure A	<A>	Pure C	<C>	<adv>
Total	17.6	11.3	11.4	12.6	47.2
AR	19.1 (+1.5)	11.3 (0.0)	10.8 (-0.6)	11.3 (-1.3)	47.5 (+0.3)
NAO-	16.1 (-1.5)	11.0 (-0.3)	12.7 (+1.3)	13.3 (+0.7)	46.9 (-0.3)
NAO+	17.2 (-0.4)	10.9 (-0.4)	11.2 (-0.2)	12.7 (+0.1)	48.0 (+0.8)
SB	18.0 (+0.4)	11.9 (+0.6)	11.0 (+0.4)	13.0 (+0.4)	46.0 (-1.2)

Table 1. Frequency of occurrence (%) of WT for the total study period and disaggregated by WR. In parenthesis, deviation from the expected frequency.

Although Cyclonic types account for only 24.0 % of all days, they represent 45.0 % of rainy days and contribute 56.5 % of the rainfall totals (Table 2). In contrast, while remains the most frequent category for rainy days (46.0 %), it only accounts for 38.4 % of the total rainfall. A comparison between the proportion of rainy days and rainfall totals across WR–WT pairs reveals that for C types, the percentage of rainfall totals consistently exceeds the percentage of rainy days. This discrepancy is more pronounced under AR and SB WRs than under NAO− and NAO+. For all other WR–WT combinations, the share of accumulated rainfall is invariably lower than the share of rainy days. A Kruskal-Wallis test confirmed that rainfall distributions vary significantly across WRs for Pure C, , and groups. Subsequent Dunn's tests identified specific significant pairs: for Pure C, differences were restricted to AR and NAO+. For , significant disparities emerged between AR–NAO−, AR–NAO+, and SB–NAO+. Finally, for , all WR combinations were statistically distinct, with the sole exception of the AR–SB.

	WR	Pure A	<A>	Pure C	<C>	<adv>
Days (Rain)	AR	1.4 (0.9)	1.7 (1.1)	6.3 (9.1)	6.0 (7.3)	14.1 (13.0)
	NAO-	0.6 (0.6)	1.0 (0.4)	5.4 (7.4)	4.7 (4.9)	9.1 (7.4)
	NAO+	0.6 (0.4)	0.9 (0.4	5.2 (5.5)	4.5 (5.2)	8.6 (5.9)
	SB	1.1 (0.7)	1.7 (0.8)	5.9 (8.9)	6.9 (8.3)	14.3 (12.2)
P99	AR	44.5	60.3	150.4	159.4	110.6
	NAO-	118.0	16.1	131.2	107.1	71.2
	NAO+	45.5	28.5	95.7	113.4	78.1
	SB	36.1	63.4	153.8	171.8	95.1

Table 2. Contribution (%) of each WR-WT pair to rainy days and rainfall totals (in parenthesis). 99th percentile (mm) of precipitation under each WR-WT pair

The 99th percentile (P99) of daily precipitation was compared across WR-WT pairs against the global threshold (112.6 mm). While A WTs generally fall below this baseline with high variability, C WTs consistently exceed it. In particular, the AR and SB WRs enhance extreme precipitation values when coupled with C WT.

DISCUSSION

The preliminary analysis conducted in this study demonstrates, firstly, that the frequency of WTs is significantly modulated by the prevailing WRs. Specifically, certain regimes such as the AR promote A conditions, whereas NAO- favor the occurrence of C WT.

In terms of precipitation dynamics, C WT have been identified as the most efficient. Despite not being the most frequent patterns, they account for the largest share of total accumulated rainfall. This efficiency is further enhanced when a C WT coincides with AR or SB, a synergy that is also clearly evident in the P99 of precipitation events. Previous studies, focusing on 100 mm (Grimalt-Gelabert et al. 2021) threshold already found the relevance of C WT in extreme rainfall in Balearic Islands, but no relationship was established with WR. On the other hand, Beguería et al. (2025) found, for the same area, a relation of extreme rainfall events with NAO, but NAO was used as a teleconnection index instead as a categorical WR.

It must be emphasized, however, that these findings represent an initial assessment. This study, which constitutes an exploratory analysis, has some limitations that must be addressed before drawing final conclusions. First, to fully evaluate the relevance of WR-WT coupling in extreme rainfall across Balearic Islands, more weather stations must be analyzed. Second, a seasonal analysis is required, as the NAO influence is predominantly manifested during winter months. Third, a more robust statistical framework is required to quantify the relevance between different WRs.

CONCLUSIONS

The findings of the study suggest that large-scale mid-tropospheric configurations act as a fundamental modulator of surface-level synoptic patterns, directly influencing rainfall dynamics as well as the magnitude of extreme rainfall events in the region.

ACKNOWLEDGMENTS

This work has been sponsored by the research project “Floods and Droughts – GenAI-enabled solutions for water resilience and citizen-centered crisis management-101299010”, supported by the Digital Europe Programme (2021-2027). R.S.N. is supported by grant RYC2021-034330-I and by project PID2024-157662OB-C21, funded by MCIN/AEI/ 10.13039/501100011033 and by “European Union Next Generation EU/PRTR

REFERENCES

Beguería, S., Tomas-Burguera, M., Serrano-Notivoli, R., Barriopedro, D. & Vicente-Serrano, S.M. (2025). Evolution of extreme precipitation in Spain: contribution of atmospheric dynamics and long-term trends. *Stoch Environ Res Risk Assess* 39, 2137–2157.https://doi.org/10.1007/s00477-025-02961-x

Cassou, C. (2008). Intraseasonal interaction between the Madden-Julian oscillation and the North Atlantic Oscillation. *Nature*. 455, 523-527. https://doi.org/10.1038/nature07286

Grimalt-Gelabert, M., Alomar-Garau, G. & Martín-Vide, J. (2021). Synoptic causes of torrential rainfall in the Balearic Islands (1941-2010). *Atmosphere*, 12(8), 1035

Martín-Vide J. & López-Bustins JA. (2006). The Western Mediterranean Oscillation and rainfall in the Iberian Peninsula. *Int. J. Climatol.* 26: 1455-1475. https://doi.org/10.1002/joc.1388

Peña-Angulo, D., Estrany, J., García-Comendador, J., Fortesa, J., Tomas-Burguera, M., Company, J., Alorda, B. & Nadal-Romera, E. (2021). Influence of weather types on the hydrosedimentary response in three small catchments on the Island of Mallorca, Spain. *Environ. Res.*, 192, 110324. https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110324

Trigo, R.M. & DaCamara, C.C. (2000). Circulation weather types and their influence on the precipitation regime in Portugal. *Int. J. Climatol*. 20 (13).

Trigo, R.M., Pozo-Vázquez, D., Osborn, T.J., Castro-Díez, Y., Gámiz-Fortis, S. & Esteban-Parra, M.J. (2004). North Atlantic oscillation influence on precipitation, river flow and water resources in the Iberian Peninsula. *Int. J. Climatol.* 24 (8), 925-944 https://doi.org/10.1002/joc.1048

Yiou, P., Goubanova, K., Li, Z. X. & Nogaj, M. (2008). Weather regime dependence of extreme value statistics for summer temperature and precipitation, Nonlin. Processes Geophys., 15, 365-378, doi:10.5194/npg-15-365-2008.

EL PAPEL DE LA ACTIVIDAD MICROBIANA DEL SUELO EN LA REGENERACIÓN NATURAL DE PINUS PINEA: IMPLICACIONES PARA LA RESILIENCIA DE PINARES MEDITERRÁNEOS

Elisa PÉREZ MARTÍN[1], Javier MARTÍNEZ MORENO[2], David MORENO PÉREZ[1], Marina ORTIZ SANZ[1], Belén TURRIÓN NIEVES[1], Francisco LAFUENTE ÁLVAREZ[1], Carmen ROMERALO TAPIA[3], Marta PARDOS MINGUEZ[3], Rafael CALAMA SAINZ[3], Gabriel SANGÜESA-BARREDA[4], Juan Francisco FUENTES PÉREZ[2], Celia HERRERO DE AZA[1]

[1]Grupo de Calidad y Sostenibilidad del Suelo, Departamento de Ciencias Agroforestales, Instituto de Investigación en Gestión Forestal Sostenible (iuFOR). Universidad de Valladolid, ETSIIAA. Palencia.
[2]Grupo de Ecohidráulica y Ecohidrología Aplicada, Departamento de Ingeniería Agrícola y Forestal, Instituto de Investigación en Gestión Forestal Sostenible (iuFOR). Universidad de Valladolid, ETSIIAA. Palencia.
[3]Departamento de Dinámica y Gestión Forestal, Instituto de Ciencias Forestales, INIA-CSIC, Madrid.
[4]Departamento de Ciencias Agroforestales. Instituto Universitario de Investigación en Gestión Forestal Sostenible (iuFOR), EiFAB, Escuela de Ingeniería Forestal, Agronómica y de la Industria Bioenergética. Universidad de Valladolid.

eperez@uva.es,javiermm@uva.es,mariabelen.turrion@uva.es, francisco.lafuente@uva.es, carmen.romeralo@inia.csic.es, pardos@inia.csic.es, rcalama@inia.csic.es, gabriel.sanguesa@uva.es, juanfrancisco.fuentes@uva.es, celia.herrero.aza@uva.es

RESUMEN

La regeneración natural es un proceso clave para la resiliencia de los ecosistemas forestales mediterráneos, influido tanto por factores climáticos como edáficos y biológicos. Las comunidades microbianas del suelo desempeñan un papel fundamental en la regulación de la descomposición de la materia orgánica y la disponibilidad de nutrientes, aunque su relación con la regeneración puede estar modulada por la profundidad del suelo y la heterogeneidad espacial.

Este estudio analiza la respiración del suelo y la biomasa microbiana en pinares de Pinus pinea en relación con distintos niveles de regeneración natural, la profundidad del suelo y la variabilidad espacial. El muestreo se realizó en seis parcelas de Valladolid, considerando tres profundidades de suelo y diferentes zonas de influencia arbórea. Se observaron valores más altos de respiración en los puntos de muestreo con regeneración activa, lo que sugiere una asociación entre una mayor actividad

microbiana y la regeneración activa. Además, la actividad microbiana mostró una fuerte correlación con la profundidad del suelo, registrándose los valores más elevados en la capa superficial.

Palabras clave: actividad microbiana del suelo, regeneración natural, resiliencia, pino piñonero.

ABSTRACT

Natural regeneration is a key process in the resilience of Mediterranean forest ecosystems, influenced by climatic, edaphic and biological factors. Soil microbial communities play a fundamental role in regulating organic matter decomposition and nutrient availability, although their relationship with regeneration may be modulated by soil depth and spatial heterogeneity.

This study analyzes soil respiration and microbial biomass in *Pinus pinea* forests in relation to different levels of natural regeneration, soil depth, and spatial variability. Sampling was conducted in six plots in Valladolid, across three soil depths and different tree influence zones. Higher respiration values were observed in sampling points with active regeneration, suggesting an association between increased microbial activity and active regeneration. In addition, microbial activity showed a strong correlation with soil depth, with higher values in the surface layer.

Keywords: soil microbial activity, natural regeneration, resilience, stone pine.

INTRODUCCIÓN

La regeneración natural es clave para la resiliencia de los ecosistemas forestales mediterráneos frente al cambio climático, donde factores como la disponibilidad hídrica, la calidad del suelo y las interacciones biológicas determinan el establecimiento de plántulas (Castro et al., 2022; Pardos & Calama, 2022). El suelo actúa como un sistema vivo que regula la descomposición de la materia orgánica y la disponibilidad de nutrientes, procesos en los que la comunidad microbiana desempeña un papel central (Bardgett & van der Putten, 2014). No obstante, esta relación puede estar modulada por la profundidad y la heterogeneidad espacial asociada a la vegetación (Fierer, 2017).

En pinares de *Pinus pinea* L., donde la regeneración es frecuentemente irregular (Manso et al., 2014), este estudio evalúa la relación entre la respiración del suelo, la biomasa microbiana y la regeneración natural, considerando la profundidad y la variabilidad espacial a microescala.

METODOLOGÍA

El estudio se realizó en el Monte de Utilidad Pública nº 44 “Tamarizo Nuevo” (Portillo, Valladolid), en un clima mediterráneo continentalizado. Los suelos, desarrollados sobre materiales detríticos de la cuenca del Duero, son mayoritariamente arenosos y poco desarrollados.Se seleccionaron seis parcelas circulares (8 m de radio) monoespecíficas de Pinus Pinea representativas de un gradiente de regeneración: tres sin regeneración y tres con alta cobertura (>1000 plántulas/ha).

En cada parcela se establecieron tres puntos de muestreo: control (C) fuera de la influencia del árbol madre, bajo influencia sin regeneración (T) y bajo influencia con regeneración activa (R), localizado bajo copa o en un radio de ~3 m cuando el árbol había sido cortado. Las muestras se tomaron a tres profundidades (0–5, 5–10 y 10–20 cm). La respiración del suelo se determinó mediante incubación a 25 °C durante 76 días, cuantificando el CO_2 liberado.

La biomasa microbiana se estimó mediante fumigación-extracción (Vance et al., 1987), obteniendo el carbono de la biomasa microbiana (CBM) y el nitrógeno de la biomasa microbiana (NBM), expresados como mg por kg de suelo a capacidad de campo.

El análisis estadístico se basó en modelos lineales mixtos (LMM) para la respiración y el NBM, y un modelo lineal generalizado (GLM, distribución Tweedie) para el CBM. Se consideraron como factores fijos: la cobertura de regeneración, el punto de muestreo (C, T, R) y la profundidad. Se incluyó la parcela como efecto aleatorio y el punto de muestreo anidado dentro de la regeneración, puesto que el punto de muestreo R solo está presente en parcelas con regeneración activa.

RESULTADOS

No se detectaron diferencias significativas en la respiración del suelo, el CBM ni el NBM entre coberturas de regeneración, mientras que la profundidad mostró diferencias significativas, con una disminución progresiva y valores máximos en 0–5 cm. El punto de muestreo mostró diferencias en la respiración y el NBM, observándose heterogeneidad espacial: los puntos con regeneración activa (R) mostraron mayor respiración, mientras que el NBM fue mayor, aunque no de forma significativa, en los puntos bajo influencia del árbol madre.

		Respiración			NBM			CBM	
Efecto	niveles	E.F	media		E.F	media		E.F	media
Reg_		0,7631			0,5178			0,0821	
Pr	0-5	<0,0001	803a		0,0016	4,83 a		0,0259	99,6 a
	5-10		603 b			1,20 b			55,4 b
	10-20		378 c			1,84 b			71,5 ab
			n.reg	reg		n.reg	reg		
Reg_(po)	C	<0,0001	487 aA	511 aA	0,0076	0,61 aA	1,67 aA	0,2571	
	T		616 aA	618 aA		4,54 bA	3,55 aA		
	R		-	783 b		-	4,20a		

Tabla 1. Efectos fijos y medias de respiración, carbono de la biomasa microbiana (CBM) y nitrógeno de la biomasa microbiana (NBM) en función de la profundidad, la cobertura de regeneración y el punto de muestreo

Reg_ = cobertura de regeneración; Pr = profundidad; Reg(po) punto de muestreo anidado a Reg_. C = punto control; T = punto bajo influencia del árbol madre sin regeneración activa; R = punto bajo influencia del árbol madre con regeneración activa; n.reg = parcelas sin regeneración; reg = parcelas con regeneración. E.F. = valor p del efecto fijo en el modelo estadístico (valores en negrita indican significación estadística, p < 0,05). Letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas entre puntos de muestreo (po), mayúsculas entre condiciones de regeneración (reg y n.reg). CC = capacidad de campo. La respiración se expresa como mg de carbono acumulado por kg de suelo seco; NBM y CBM se expresan como mg de N y C respectivamente por kilogramo de suelo a capacidad de campo. Los valores de CBM para el efecto Reg(po) no se muestran por falta de significación.

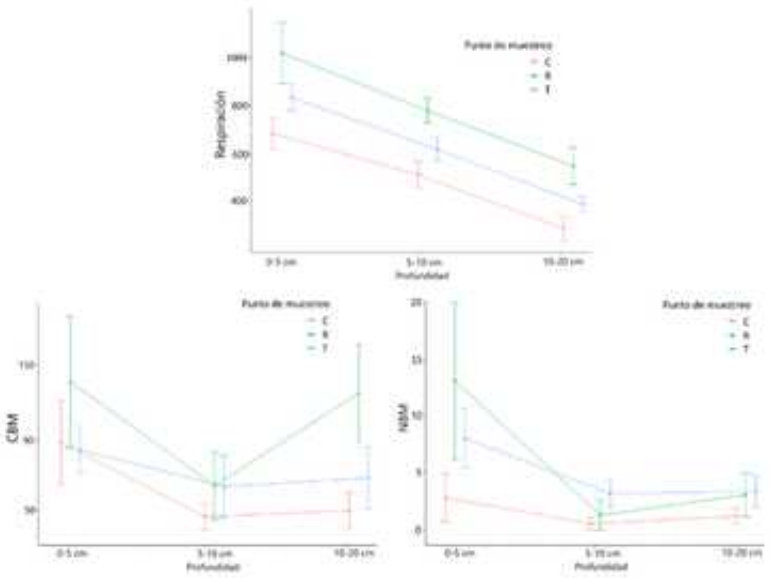


Figura 1. Variación de la respiración del suelo, carbono de la biomasa microbiana (CBM) y nitrógeno de la biomasa microbiana (NBM) según profundidad y punto de muestreo (C, R y T). Los puntos representan medias y las barras indican ± error estándar (EE).

DISCUSIÓN

Los resultados revelan una ausencia de diferencias significativas en los parámetros microbianos entre parcelas con y sin regeneración a escala de parcela, junto con una disminución significativa de la respiración, el CBM y el NBM con la profundidad. Esta fuerte estratificación funcional coincide con lo descrito en otros ecosistemas forestales, donde la capa superficial concentra hojarasca y raíces finas, actuando como un foco de actividad biológica consistente con el concepto de "hotspots" microbianos (Kumar & Garkoti, 2022; Kuzyakov & Blagodatskaya, 2015). Estudios previos en pinares españoles han mostrado que la actividad microbiana está altamente condicionada por factores edafoclimáticos como la disponibilidad hídrica y el pH (Bueis et al., 2018), lo que refuerza que la actividad observada puede estar modulada por condiciones edáficas locales asociadas a la profundidad.

La ausencia de diferencias entre parcelas con y sin regeneración, junto con la existencia de diferencias entre puntos de muestreo, sugiere que los efectos se producen a microescala y se diluyen a escalas mayores. Pennanen et al. (1999) demostraron que la biomasa microbiana en suelos de coníferas presenta autocorrelación espacial a distancias de 3-4 m, y Kumar & Garkoti (2022) mostraron que el efecto rizosférico desaparece a más de 10 cm de la raíz. Es posible que se esté produciendo un efecto sinérgico entre la actividad microbiana y el asentamiento y

crecimiento de las plantas, ya que la actividad microbiana favorece la mineralización de materia orgánica y con ello la disponibilidad de nutrientes (Kumar & Garkoti, 2022; Bardgett et al., 2014; Kuzyakov & Blagodatskaya, 2015). Así, la presencia de vegetación herbácea o arbustiva en parcelas sin regeneración podría causar niveles similares de actividad microbiana entre parcelas (Yang et al., 2018). El incremento de la respiración en zonas con regeneración no se acompañó de aumentos consistentes en CBM o NBM. Esto podría reflejar que los microorganismos priorizan inicialmente el recambio celular rápido sobre el crecimiento neto (Blagodatskaya et al., 2011), aumentando su actividad metabólica sin incrementar su biomasa total (Kuzyakov & Blagodatskaya, 2015).

CONCLUSIONES

La actividad microbiana no mostró diferencias significativas en relación a la cobertura de regeneración, aunque a microescala los puntos con regeneración activa sí mostraron una mayor actividad respiratoria, sugiriendo asociaciones espaciales más que relaciones causales. Se observó una fuerte influencia de la profundidad en la actividad microbiana. La conservación de la funcionalidad microbiana en los horizontes superficiales puede contribuir a la resiliencia de los pinares mediterráneos en un contexto de cambio climático, destacando la importancia de mantener la heterogeneidad estructural del bosque y proteger el suelo frente a perturbaciones.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por los proyectos BEGINPINE (PID2022-136906OB-C21) e IMFLEX (PID2021-126275OB-C22) y por el programa Garantía Juvenil – UVA-05-B. Se agradece al proyecto «Escalera de Excelencia» (CLU-2025-2-07) y al servicio Territorial de Medio Ambiente de Valladolid por el apoyo recibido.

REFERENCIAS

Bardgett, R. D., & van der Putten, W. H. (2014). Belowground biodiversity and ecosystem functioning. *Nature*, *515*(7528), 505-511.

Blagodatskaya, E., Yuyukina, T., Blagodatsky, S., & Kuzyakov, Y. (2011). Three-source-partitioning of microbial biomass and of CO_2 efflux from soil to evaluate mechanisms of priming effects. *Soil Biology and Biochemistry*, *43*(4),778-786.

Bueis, T., Turrión, M. B., Bravo, F., Pando, V., & Muscolo, A. (2018). Factors determining enzyme activities in soils under *Pinus halepensis* and *Pinus sylvestris* plantations in Spain: A basis for establishing sustainable forest management strategies. *Annals of Forest Science*, *75*, Article 34.

Castro, D., Concha, C., Jamett, F., Ibáñez, C., & Hurry, V. (2022). Soil microbiome influences on seedling establishment and growth of *Prosopis chilensis* and *Prosopis tamarugo*. *Plants*, *11*(20), Article 2717.

Fierer, N. (2017). Embracing the unknown: Disentangling the complexities of the soil microbiome. *Nature Reviews Microbiology*, *15*(10), 579-590.

Kumar, S., & Garkoti, S. C. (2022). Rhizosphere influence on soil microbial biomass and enzyme activity in banj oak, chir pine and banj oak regeneration forests in the central Himalaya. *Geoderma*, *409*, Article 115626.

Kuzyakov, Y., & Blagodatskaya, E. (2015). Microbial hotspots and hot moments in soil: Concept & review. *Soil Biology and Biochemistry*, *83*, 184-199.

Manso, R., Pukkala, T., Pardos, M., Miina, J., & Calama, R. (2014). Modelling *Pinus pinea* forest management to attain natural regeneration under present and future climatic scenarios. *Canadian Journal of Forest Research*, *44*(3), 250-262.

Pardos, M., & Calama, R. (2022). Adaptive strategies of seedlings of four Mediterranean co-occurring tree species in response to light and moderate drought. *Forests*, *13*(2), Article 154.

Pennanen, T., Liski, J., Bååth, E., Kitunen, V., Uotila, J., Westman, C. J., & Fritze, H. (1999). Structure of the microbial communities in coniferous forest soils in relation to site fertility and stand development stage. *Microbial Ecology*, *38*(2), 168-179.

Yang, Y., Zhang, X., Zhang, C., Wang, H., Fu, X., Chen, F., Wan, S., & Wang, J. (2018). Understory vegetation plays the key role in sustaining soil microbial biomass and extracellular enzyme activities. *Biogeosciences*, *15*(14), 4481-4494.

INTEGRANDO MODELIZACIÓN CLIMÁTICA Y ECOLÓGICAVEN LA CONSERVACIÓN DE ESPECIES Y HÁBITATS PRIORITARIOS (D92/43/CEE) EUROVMEDITERRÁNEOS: DOS ESTUDIOS DE CASO.

Giovanni-Breogán FERREIRO-LERA[1], Ángel PENAS[1], Sara DEL RÍO[1,2]

[1]Departamento de Biodiversidad y Gestión Ambiental, Facultad de Ciencias Biológicas y Ambientales, Universidad de León, Campus de Vegazana s/n. E-24071, León, España
[2]Instituto de Ganadería de Montaña (CSIC-ULE), Vega de Infanzones, Carretera León-Vega de Infanzones (Finca Marzanas-Grulleros), León, 24346, España

gferl@unileon.es, apenm@unileon.es, sriog@unileon.es

RESUMEN

El cambio climático, unido a otros forzamientos antrópicos, parece estar dirigiendo la Región Mediterránea Europea hacia una futura crisis de biodiversidad. Esta crisis podría desembocar en: pérdida de poblaciones, extinciones locales, o en un riesgo para ciertos hábitats de importancia comunitaria (HIC; Directiva 92/43/CEE). En esta comunicación se presenta un abordaje en el que se elaboran Modelos de Nicho Ecológico partiendo de la evaluación regionalizada de Modelos de Circulación General, y pasando por la génesis de una database basada en delta-anomalías (δ-MedBioclim). Así, se presenta un estudio de caso para la especie de interés comunitario Prunus lusitanica L. (laurel portugués o «loro»), que incluye la utilización de la humedad relativa y de la probabilidad de nieblas en la modelización del nicho, así como un segundo ejemplo analizando los posibles cambios en los HIC dominados por bosques de Fagus sylvatica L. (hayedos). Se espera que los resultados de los estudios derivados participen de la estrategia europea de conservación de espacios Red Natura 2000, compromiso adquirido en la Directiva 92/43/CEE que debemos esgrimir ante un futuro incierto y cambiante.

Palabras clave: cambio climático, Directiva 92/43/CEE, hayedos, Modelos de Distribución de Especies, Prunus lusitanica subsp. lusitanica, Región Mediterránea Europea.

ABSTRACT

Climate change, together with other anthropogenic drivers, appears to be steering the European Mediterranean Region toward a future biodiversity crisis. This crisis may result in population declines or local extinctions, as well as increased risk for certain Habitats of Community Interest (HIC; Directive 92/43/EEC). In this communication, we

present an approach based on the development of Ecological Niche Models, derived from the regional evaluation of General Circulation Models and supported by the construction of a database based on delta anomalies (δ-MedBioclim). A case study is provided for the species of community interest Prunus lusitanica L. (Portuguese laurel), incorporating relative humidity and fog probability into niche modelling. A second example examines potential changes in HICs dominated by Fagus sylvatica L. forests (beech forests). The results of these studies are expected to contribute to the European Natura 2000 conservation strategy, a commitment established under Directive 92/43/EEC, which must be upheld in the face of an uncertain and rapidly changing future.

Key words: beech forests, climate change, Directive 92/43/CEE, European Mediterranean Region, Prunus lusitanica subsp. lusitanica, Species Distribution Models.

INTRODUCCIÓN

Según el Primer Informe de Evaluación (MAR1) del Panel Mediterráneo de Expertos en Cambio Climático y Medioambiental (MedECC), el aumento de la temperatura en la Región Mediterránea podría superar en un 20% la media global (Cramer et al., 2020). Esto, unido a las más difícilmente predecibles anomalías en la precipitación y a las alteraciones en otros eventos climáticos (vientos, ocurrencia de nieblas, fenómenos extremos…), podrán tener graves implicaciones en los ecosistemas y en las comunidades que los conforman.

La disciplina que relaciona Climatología y vida se conoce como Bioclimatología, concepto que se sustituye por el de Fitoclimatología cuando nos referimos a vida vegetal y, más concretamente, a la influencia del clima en la distribución de las plantas y de las comunidades vegetales en la Tierra (Rivas-Martínez et al., 2011). A lo largo de la historia, las plantas han sido utilizadas como bioindicadores, no sólo para organizar el mundo en regiones climáticamente homogéneas (biomas, ecorregiones, etc.), sino también como sujetos sintomáticos de cambios a gran escala.

En esta comunicación se presentan dos estudios de caso centrados en especies y hábitats especialmente vulnerables. Por un lado, se presenta la aplicación de la humedad relativa y de la ocurrencia de nieblas en la modelización del nicho potencial de Prunus lusitanica subsp. L. lusitanica, un relicto de la flora terciaria ibérica. Por otro lado, se presenta un segundo ejemplo donde tratamos de predecir la distribución futura de los diferentes hábitats de importancia comunitaria dominados por hayas (Fagus sylvatica L.). Se espera que las conclusiones derivadas participen de la estrategia de información, monitoreo y conservación de los táxones y comunidades amparados por la Directiva 92/43/CEE en un contexto incierto y cambiante.

METODOLOGÍA

Para generar Modelos de Nicho Ecológico necesitamos, fundamentalmente: i) lugares donde el fenómeno a modelar (especie/hábitat) ocurra; ii) condiciones ambientales asociadas a los lugares de presencia y de ausencia del fenómeno; y iii) un algoritmo que correlacione ambas variables.

1. **Presencias.** En bases de datos abiertas: i) Agencia Medioambiental Europea (2020), para los hábitats; y ii) GBIF (2025), en el caso de P. lusitanica, donde también se incluyeron datos recogidos en campo.
2. **Variables ambientales.** Las variables climáticas para el período de referencia (1981-2010) se obtuvieron de CHELSA (Karger et al., 2017). Por otro lado, δ-MedBioclim (Ferreiro-Lera et al., 2025a) fue utilizada para obtener los datos proyectados bajo los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5 a medio (2051-2075) y largo (2076-2100) plazo. Esta base de datos generaliza mediante delta-anomalías CHELSA y ERA5 Land para una diversidad mayor de Modelos de Circulación General (GCMs). Así, se pudieron seleccionar aquellos GCMs que, en estudios previos habían sido identificados como de rendimiento óptimo en la región de estudio (Ferreiro-Lera et al., 2024; Ferreiro-Lera et al., 2025b). También se incluyeron variables edáficas (Poggio et al., 2021), topográficas y, de manera reseñable en el caso de P. lusitanica, de humedad relativa (Metz et al., 2024) y de probabilidad de nieblas (Egli et al. 2018).
3. **Algoritmo.** El algoritmo seleccionado fue Bayesian Additive Regression Trees (BART), implementado en R a través del paquete embarcadero (Carlson, 2020). Este algoritmo contiene, además, un módulo de selección de variables que retiene el conjunto mínimo necesario, descartando aquellas menos relevantes en la predicción.

La vulnerabilidad se evaluó mediante el índice de vulnerabilidad de Felicísimo et al. (2012), adaptado por Ferreiro-Lera et al. (2026a).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. *Prunus lusitanica* subsp. *lusitanica*

Los resultados obtenidos para *P. lusitanica* han sido recientemente publicados en Ferreiro-Lera et al. (2026a). Este estudio demuestra que la incorporación de variables como humedad relativa y probabilidad de nieblas pueden modificar sustancialmente las predicciones de los Modelos de Nicho Ecológico. En resumen, su inclusión conduciría a una estimación más restrictiva de las áreas idóneas para la especie y, por tanto, a un incremento de la vulnerabilidad climática proyectada a largo plazo (2076-2100). Esto evidenciaría que modelos basados exclusivamente en variables bioclimáticas convencionales podrían infraestimar el riesgo real en especies relictas dependientes de condiciones microclimáticas más específicas.

3.2. Hayedos de importancia comunitaria

La Figura 1 muestra las áreas óptimas para los hayedos de importancia comunitaria en la Región Mediterránea Europea que se mantendrían (M), perderían (P) o ganarían (G) para el futuro a largo plazo (2076-2100) bajo el escenario SSP2-4.5. Cabe señalar que la suma de estas dos primeras (M+P) se corresponde con las áreas óptimas predichas para el período de referencia (1981-2010). Esta figura se complementa con la Figura 2, donde se aprecia la notable disminución en la probabilidad de presencia de todos los hábitats estudiados comparando el escenario SSP2-4.5 con el más pesimista SSP5-8.5.

Los hábitats 9120 y 9140 correspondientes a hayedos acidófilos occidentales y hayedos subalpinos, respectivamente, así como el 9150, de hayedos basófilos, parecen los más afectados, encontrándose en una situación Vulnerable (VU)/En Peligro (EN). En contraposición, los hayedos del este de Europa (91K0, 91V0 y 91W0), de carácter marcadamente más continental, sufrirían en menor medida esta pérdida de territorio. Si bien la pérdida de probabilidad de presencia con respecto a la situación actual es evidente (Figura 2), no hay diferencias significativas entre los escenarios futuros y, en algunos casos (91K0) incluso podrían aparecer a futuro nuevas zonas apropiadas (Figura 1).

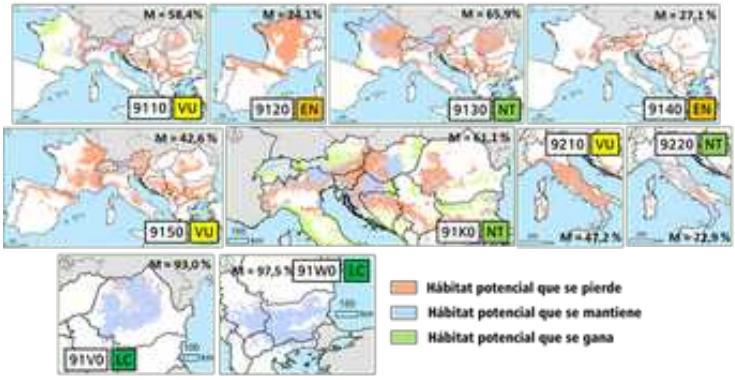


Figura 2. Probabilidad de presencia presente (1981-2010) y futura (2076-2100; SSP2-4.5 y SSP5-8.5) para cada uno de los hayedos analizados.

Estos resultados parecen atribuirse a dos condicionantes bioclimáticos especialmente críticos para los hayedos (del Río et al., 2019) y que, hipotéticamente, podrían sufrir cambios drásticos en las futuras décadas: i) el aumento en la continentalidad (Ferreiro-Lera et al., 2026b; López et al., 2017); y ii) el aumento en la mediterraneidad, es decir, la prevalencia de veranos más cálidos y con menos precipitación (Ferreiro-Lera et al., 2026b; Boussalim & Dallahi, 2024). Esto explicaría por qué los hayedos que ya se desarrollan en zonas muy continentales (91K0, 91V0 o 91W0) podrían mantener en mayor medida sus áreas óptimas.

CONCLUSIONES

Si bien las aproximaciones basadas en Modelos de Nicho Ecológico no están exentas de una considerable incertidumbre, diversos estudios recientes han puesto de manifiesto su utilidad para la conservación vegetal y para la gestión y planificación del territorio en un contexto de cambio climático (Abdel Moniem et al. 2025; Kothandaraman et al. 2025). Los casos de estudio presentados ponen de manifiesto el impacto potencial del cambio climático sobre especies y hábitats cuya conservación constituye un compromiso para los países firmantes de la Directiva 92/43/CEE, evidenciando riesgos que pueden no ser detectables sin enfoques de modelización integrados.

En este contexto, la modelización climática y ecológica deben avanzar de forma conjunta con el fin de: i) generar proyecciones a escalas espacialmente explícitas y operativas para la gestión del territorio; ii) mejorar la disponibilidad y calidad de variables escasamente consideradas (como la probabilidad de niebla) pero clave para determinadas comunidades vegetales; y iii) reducir la incertidumbre en la evaluación de la vulnerabilidad climática, proporcionando herramientas robustas para anticipar y mitigar los impactos sobre el patrimonio natural en las próximas décadas.

AGRADECIMIENTOS

Investigación financiada por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades (Ref.: FPU21/03022).

REFERENCIAS

Abdel Moniem, H. E., Mallon, C., Allen, B., Littlefair, C., Leston, L., Azeria, E., Petty, A., & Pendlebury, D. (2025). Thresholding species distribution models: Simple approaches for land-use planning in multifunctional landscapes. Methods in Ecology and Evolution, 00, 1–18. https://doi.org/10.1111/2041-210x.70226

Boussalim, Y., & Dallahi, Y. (2024). Future shifts in climatic conditions promoting northward expansion of the Mediterranean climate in the circum-Mediterranean region. Environmental Monitoring and Assessment, 196, 1129. https://doi.org/10.1007/s10661-024-13286-7

Carlson, C. J. (2020). embarcadero: Species distribution modelling with Bayesian additive regression trees in r. Methods in Ecology and Evolution, 11(7), 850–858. https://doi.org/10.1111/2041-210X.13389

del Río, S., Álvarez-Esteban, R., Cano, E., Pinto-Gomes, C., & Penas, Á. (2018). Potential impacts of climate change on habitat suitability of Fagus sylvatica L. forests in spain. Plant Biosystems, 152(6), 1205–1213. https://doi.org/10.1080/11263504.2018.1435572

Egli, S., Thies, B., & Bendix, J. (2018). A Hybrid Approach for Fog Retrieval Based on a Combination of Satellite and Ground Truth Data. Remote Sensing 2018, Vol. 10, Page 628, 10(4), 628. https://doi.org/10.3390/RS10040628

European Environment Agency (2020) Article 17 - 2020 spatial data. https://www.eea.europa.eu/

Ferreiro-Lera, G. B., Penas, Á., & del Río, S. (2024). Unveiling Deviations from IPCC Temperature Projections through Bayesian Downscaling and Assessment of CMIP6 General Circulation Models in a Climate-Vulnerable Region. Remote Sensing, 16(11), 1831. https://doi.org/10.3390/rs16111831

Ferreiro-Lera, G. B., Penas, Á., & del Río, S. (2025a). δ-MedBioclim: A New Dataset Bridging Current and Projected Bioclimatic Variables for the Euro-Mediterranean Region. Data 2025, Vol. 10, Page 78, 10(5), 78. https://doi.org/10.3390/DATA10050078

Ferreiro-Lera, G.-B., Penas, Á., & del Río, S. (2025b). Obtaining refined Euro-Mediterranean rainfall projections through regional assessment of CMIP6 General Circulation Models. Global and Planetary Change, 246, 104725. https://doi.org/10.1016/J.GLOPLACHA.2025.104725

Ferreiro-Lera, G. B., Raposo, M., Meireles, C., Pinto-Gomes, C. J., Penas, Á., & del Río, S. (2026a). The future of the past: How fog and humidity modulate the climate vulnerability of Iberian laurissilva relict *Prunus lusitanica* L. Journal of Environmental Management, 405, 129693. https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2026.129693

Ferreiro-Lera, G. B., Penas, Á., & del Río, S. (2026b). Projected Reorganization of Euro-Mediterranean Bioclimates under Climate Change: Evidence from CMIP6 Multi-model Ensemble. Earth Systems and Environment 2026, 1–27. https://doi.org/10.1007/S41748-026-01145-Z

GBIF. (2025). GBIF Occurrence Download. https://www.gbif.org/es/

Karger, D. N., Conrad, O., Böhner, J., Kawohl, T., Kreft, H., Soria-Auza, R. W., Zimmermann, N. E., Linder, H. P., & Kessler, M. (2017). Climatologies at high resolution for the earth's land surface areas. Scientific Data 2017 4:1, 4(1), 1–20. https://doi.org/10.1038/sdata.2017.122

Kothandaraman, S., Dar, J. A., Sundarapandian, S., Khan, M. L., & Behera, M. D. (2025). Species distribution modeling as a forest management tool: prospects and constraints. Forests for Inclusive and Sustainable Economic Growth, 215–223. https://doi.org/10.1016/B978-0-443-31406-3.00016-3

López, M. L., Peña-Angulo, D., Marco, R., López, M. S., & González-Hidalgo, J. C. (2017). Spatial and temporal variations of bioclimatic conditions in peninsular Spain (1951-2010). Estudios Geográficos, 78, 553–577. https://doi.org/10.3989/estgeogr.201719

MedECC. Climate and Environmental Change in the Mediterranean Basin—Current Situation and Risks for the Future. First Mediterranean Assessment Report; Cramer, W., Guiot, J., Marini, K., Eds.; Mediterranean Experts on Climate and Environmental Change (MedECC): Marseille, France, 2020.

Metz, M., Haas, J., Neteler, M., Wint, W., & Jones, P. (2024). Monthly time series of spatially enhanced relative humidity for Europe at 30 arc seconds resolution (2000 - 2023) derived from ERA5-Land data. https://doi.org/10.5281/ZENODO.12699259

Poggio, L., De Sousa, L. M., Batjes, N. H., Heuvelink, G. B. M., Kempen, B., Ribeiro, E., & Rossiter, D. (2021). SoilGrids 2.0: Producing soil information for the globe with quantified spatial uncertainty. SOIL, 7(1), 217–240. https://doi.org/10.5194/SOIL-7-217-2021

Rivas-Martínez, S., Rivas-Sáenz, S., & Penas, Á. (2011). Worldwide Bioclimatic Classification System. Global Geobotany, 1, 1–634.

VARIABILITY OF SAHARAN DUST COMPOSITION AND ITS MIXING WITH INDUSTRIAL AIR POLLUTION OVER THE TROPICAL NORTH ATLANTIC

Gorka VILLENA-ARMAS[1], Fabio GIARDI[2], Jessica LÓPEZ-DARIAS[1], Silvia NAVA2[,3], Franco LUCARELLI[2,3], Khannet WADINGA FOMBA[4], Sandra FREIRE. y Sergio RODRIGUEZ[1]

[1] Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Group of Atmosphere, Aerosols and Climate, IPNA-CSIC, Tenerife, Canary Islands, Spain
[2] National Institute of Nuclear Physics (INFN), Sesto Fiorentino, 50019, FI, Italy
[3] Department of Physics and Astronomy, University of Florence, Sesto Fiorentino, 50019, FI, Italy
[4] Atmospheric Chemistry Department (ACD), Leibniz-Institute for Tropospheric Research (TROPOS), Leipzig, 04318, Germany
[5] Universidad de Cabo Verde, Praia 7943-010, Cabo Verde

gorka.villena@csic.es, giardi@fi.infn.it, j.lopez.darias@csic.es, nava@fi.infn.it, lucarelli@fi.infn.it, fomba@tropos.de, sandra.freire@docente.unicv.edu.cv and sergio.rodriguez@csic.es

RESUMEN

El polvo sahariano suele representarse en modelos como un aerosol único y composicionalmente uniforme, aunque sus efectos sobre la radiación, las nubes y la deposición de nutrientes dependen de su mineralogía y envejecimiento químico. En este estudio aportamos evidencias horarias de que la composición elemental del aerosol exportado por la Capa de Aire Sahariana (SAL, Saharan Air Layer) es químicamente heterogénea dentro de los episodios de polvo. También mostramos que la contaminación norteafricana aparece integrada en la SAL polvorienta.

Analizamos la composición química de muestras horarias de aerosol PM10 recogidas en un emplazamiento remoto de montaña en Cabo Verde, a ~1500 m s. n. m., durante el verano de 2022 (n = 968). El emplazamiento se encuentra en troposfera libre, por encima de la capa límite marina, permitiendo muestrear la SAL polvorienta sin influencia local directa. La composición elemental se determinó mediante emisión de rayos X inducida por partículas (PIXE, Particle-Induced X-ray Emission). Las contribuciones de fuentes se resolvieron con Factorización de Matriz Positiva (PMF, Positive Matrix Factorization), mediante EPA PMF 5.0, y se vincularon a regiones fuente mediante retrotrayectorias HYSPLIT de 10 días y análisis de Función de Contribución Potencial de Fuente (PSCF, Potential Source Contribution Function).

Se identificaron cinco factores fuente: dos tipos de polvo mineral, sal marina fresca, un

factor mixto rico en sulfato y otro de contaminación por metales traza. Los resultados muestran que el polvo sahariano exportado hacia el Atlántico tropical no es uniforme, sino una mezcla variable de aerosoles minerales y contaminación industrial envejecida.

Palabras clave: Capa de Aire Sahariana, mineralogía del polvo, PIXE, Factorización de Matriz Positiva, focos de contaminación.

ABSTRACT

Saharan dust is commonly represented in models as a single, compositionally uniform aerosol, yet its radiative, cloud, and nutrient-deposition effects depend on mineralogy and chemical aging. Here we provide hourly-resolved elemental composition evidence that Saharan Air Layer (SAL) outflow is chemically heterogeneous within individual dust outbreaks. We also show that North African pollution is recurrently embedded in the dusty SAL.

We analysed the chemical composition of hourly PM10 aerosol samples collected at a remote ~1500 m a.s.l. mountaintop site in Cape Verde during summer 2022 (n = 968). The site is under free troposphere conditions, i.e. above the marine boundary-layer, which allows sampling the dusty SAL under free troposphere conditions. Elemental composition was determined by Particle-Induced X-ray Emission (PIXE). Source contributions were resolved with Positive Matrix Factorization (EPA PMF 5.0) and linked to source regions using 10-day HYSPLIT back trajectories and Potential Source Contribution Function (PSCF) analysis.

We identified five source-factors: two mineral dust types, fresh sea salt, a sulphate-rich mixed factor, and a trace-metal pollution factor. The dust factors are chemically distinct and often co-exist, alternating in dominance on sub-daily timescales: Ca-rich dust linked to carbonate-rich soils in north-western Sahara, and Fe-Mn-rich dust linked to sources in the southern Sahara and Sahel. Anthropogenic contribution is low, but has an important chemical signature. Sulphate and heavy metals such as V, Ni, Zn and Pb are linked to major industrial hotspots of North Africa. These results have implications for radiative forcing, nutrient cycling, ecosystems and health.

Key words: Saharan Air Layer, dust mineralogy, PIXE, Positive Matrix Factorization, pollution hotspots

INTRODUCTION

Desert dust aerosols exert an important influence on the state of the atmosphere, from meteorological to climate time scales. The influence of dust on radiation, cloud formation and atmospheric-ocean CO2 exchanges depends on dust chemical and mineralogical composition (IPCC, 2021). Dust forecast models tend to consider 'dust aerosols' as a single compositionally uniform aerosol. A new generation of climate models is attempting to include dust mineralogy in model (Kok et al., 2026; Pérez García-Pando et al., 2016).

METHODS

2.1 Sampling places

This study focuses on the variability in the composition of North African dust. The methodology is based on the chemical speciation of 1 hour resolution of sub-10 microns aerosols (PM10) measured at a high mountain site (1400 meters altitude) in the tropical North Atlantic (Cabo Verde, Santo Antão island). The study was conducted from May to August 2022, when this region is affected by the high-altitude Saharan Air layer, i.e., the dusty air stream that spreads dust aerosols from North Africa to the Atlantic and the Americas. The sampling site is under free troposphere conditions, i.e. located above the marine boundary layer, and avoiding the influence of local emissions, sea spray and near-surface boundary-layer processes. This observational setting is therefore central to the interpretation of the dataset: the measured aerosol is representative of long-range transported aerosols without influence of local or regional emissions.

2.2 Analysis

We analysed 968 hourly PM10 aerosol samples collected with the STRAS high-time-resolution sampler (Nava et al., 2025). Elemental composition was determined by Particle-Induced X-ray Emission (PIXE). Source contributions were resolved using Positive Matrix Factorization (EPA PMF 5.0). The PMF factors were then linked to potential source regions using 10-day HYSPLIT back trajectories and Potential Source Contribution Function (PSCF) analysis (Stein et al., 2015; Polissar et al., 2001).

RESULTS Y DISCUSSION

3.1 Bulk chemical composition

We found that aerosols in the Saharan Air Layer are chemically heterogeneous. This heterogeneity is observed in dust composition and is also linked to the mixing of dust with anthropogenic pollutants. The chemical composition confirms that the aerosol sampled at the summit was dominated by Saharan mineral dust. Major crustal elements such as Al, Si, Ti, Fe, Mn, Ca, K and Mg were strongly correlated and increased together during intense SAL intrusions, while reconstructed dust mass

varied over more than two orders of magnitude and reached several hundred micrograms per cubic metre during the strongest events. Marine aerosol was a weak and intermittent contribution, and anthropogenic species were present mostly at trace levels. This contrast supports the suitability of the site and dataset for resolving chemical variability within transported Saharan dust. It also shows why high-time-resolution elemental composition is needed: dust dominates the aerosol mass, but the chemically important variability occurs in the changing proportions of dust types and in the presence of minor pollution components embedded in the SAL.

3.2 PMF

We identified five source factors: two mineral dust types, fresh sea salt, a sulphate-rich mixed factor, and a trace-metal pollution factor. The two dust factors dominate the aerosol mass but are chemically distinct. The Ca-rich dust factor contains the general Saharan crustal fingerprint but is enriched in Ca and Sr relative to aluminosilicate tracers, consistent with evaporite-rich dust from north-western Saharan source regions and adjacent Atlas foothill areas. The Fe-Mn-rich dust factor contains the same broad crustal framework but is enriched in Fe and Mn and has lower relative Ca and Sr, consistent with more lateritic and iron-oxide-rich sources in the southern Sahara and Sahel. These factors do not behave as isolated, single-source events. They frequently co-exist during the campaign and their relative contributions shift over hours to days, indicating that the SAL exports a dynamically mixed mineral aerosol rather than a compositionally uniform dust plume.

3.3 PSCF

The PSCF analysis supports this source attribution by linking high Ca-rich dust contributions to air-mass pathways over north-western Saharan carbonate-rich regions, and high Fe-Mn-rich dust contributions to pathways over the southern Sahara and Sahel. Results show that different African source regions contribute chemically distinct dust types, and atmospheric transport can combine them within the same SAL intrusion. A daily or 24-hour integrated sample would tend to blur this alternation into a single averaged Saharan dust signal, whereas hourly measurements resolve the internal structure of the outbreak. The implication is direct for model evaluation and parameterisation. Treating Saharan dust as a single mineralogical class can mask variability in shortwave absorption, alkalinity, heterogeneous chemistry, cloud activation and the potential release of nutrients such as iron and phosphorus after deposition to the ocean.

Anthropogenic contribution is low in mass, but it has an important chemical signature. The trace-metal pollution factor is enriched in V and Ni together with Zn, Pb and other trace elements, indicating influence from heavy-fuel combustion, petrochemical activity, industrial processing and related sources. These pollution signals occur as short episodes and are only clearly resolved at hourly resolution. The sulphate-rich mixed factor accounts for more than 60% of particulate sulphur and shows near-

complete chloride depletion, consistent with secondary sulphate formation and heterogeneous processing on dust and aged sea salt. Its broader temporal behaviour suggests regional-scale ageing rather than a single narrow plume. PSCF analysis links heavy metals such as V, Ni, Zn and Pb, together with sulphur-rich aerosol, to major industrial hotspots of North Africa, especially central North African industrial regions and the Algeria-Tunisia corridor. Thus, the SAL is not only a pathway for natural mineral dust export, but also a carrier of chemically aged dust-pollution mixtures over the tropical North Atlantic.

CONCLUSIONS

These findings have implications for radiative forcing, biogeochemistry, nutrient cycling, ecosystems and health. Fe-Mn-rich dust may differ from Ca-rich dust in absorption and heating because iron oxides influence shortwave optical properties, while Ca-rich dust is more alkaline and can buffer acidic processing during transport. Sulphate and trace-metal pollution, although small in mass, can modify dust hygroscopicity, cloud condensation behavior and the solubility of nutrients after deposition.

In summary, this study provides hourly-resolved elemental evidence that Saharan dust exported over the tropical North Atlantic is chemically heterogeneous and recurrently mixed with industrial air pollution. The two mineral dust types identified here, Ca-rich and Fe-Mn-rich modes linked to north-western Saharan and southern Saharan/Sahelian sources, often co-exist and alternate within SAL intrusions. In parallel, sulphate-rich and trace-metal pollution factors show that North African anthropogenic emissions are embedded in the dusty SAL, even far offshore and under free troposphere conditions. The central conclusion is that SAL aerosol should not be treated as a uniform dust plume, but as a chemically evolving mixture whose mineralogical variability and pollution ageing occur on timescales shorter than those captured by conventional low-frequency sampling.

REFERENCES

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). *Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009157896

Kok, J. F., Gupta, A. K., Evan, A. T., Pérez García-Pando, C., Li, L., Adebiyi, A. A., Albani, S., Balkanski, Y., Checa-Garcia, R., Colarco, P. R., Hamilton, D. S., Huang, Y., Ito, A., Klose, M., Mahowald, N. M., Miller, R. L., Obiso, V., Rocha Lima, A., & Wan, J. (2026). Desert dust exerts twice the longwave radiative heating estimated by climate models. *Nature Communications,* 17, Article 3191. https://doi.org/10.1038/s41467-026-70952-9

Nava, S., Vecchi, R., Prati, P., Bernardoni, V., Cadeo, L., Calzolai, G., Carraresi, L., Cialdai, C., Chiari, M., Crova, F., Forello, A., Fratticioli, C., Giardi, F., Manetti, M., Massabò, D., Mazzei, F., Repetto, L., Valli, G., Vernocchi, V., & Lucarelli, F. (2025). STRAS: A new high-time-resolution aerosol sampler for particle-induced X-ray emission (PIXE) analysis. *Atmospheric Measurement Techniques*, 18, 2137–2147. https://doi.org/10.5194/amt-18-2137-2025

Pérez García-Pando, C., Miller, R. L., Perlwitz, J. P., Rodríguez, S., & Prospero, J. M. (2016). Predicting the mineral composition of dust aerosols: Insights from elemental composition measured at the Izaña Observatory. *Geophysical Research Letters,* 43(19), 10,520–10,529. https://doi.org/10.1002/2016GL069873

Polissar, A. V., Hopke, P. K., & Harris, J. M. (2001). Source regions for atmospheric aerosol measured at Barrow, Alaska. *Environmental Science & Technology*, 35(21), 4214–4226. https://doi.org/10.1021/es0107529

Stein, A. F., Draxler, R. R., Rolph, G. D., Stunder, B. J. B., Cohen, M. D., & Ngan, F. (2015). NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 96(12), 2059–2077. https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00110.1

CALENTAMIENTO DEPENDIENTE DE LA ALTITUD EN EL PIRINEO: DATOS, ANÁLISIS Y RESULTADOS

Pere ESTEBAN VEA [1,2], Javier SIGRÓ RODRÍGUEZ [3,4], Marc PROHOM DURAN [1], Juan Ignacio LÓPEZ-MORENO [5], Jordi CATEURA SABRI [1], Jordi CUNILLERA GRAÑÓ [1]

[1] *Servei Meteorològic de Catalunya (SMC), Generalitat de Catalunya.*
[2] *Antartic, Arctic and Alpine environments (ANTALP) research group. Universitat de Barcelona.*
[3] *Centre en Canvi Climàtic C3, Department de Geografia, Universitat Rovira i Virgili (URV). Tarragona*
[4] *Institut Universitari de Recerca en Sostenibilitat, Canvi Climàtic i Transició Energètica (IU-RESCAT), Universitat Rovira i Virgili (URV). Tarragona*
[5] *Instituto Pirenaico de Ecología (IPE-CSIC), Campus de Aula Dei, Zaragoza.*

pere.esteban@gencat.cat

RESUMEN

En el marco del proyecto LIFE-SIP Pyrenees4Clima (2024–2031) se están desarrollando acciones para detectar y analizar el calentamiento dependiente de la altitud en los Pirineos, también conocido con el término inglés Elevation Dependent Warming (EDW). Una tarea central es la compilación de las series de temperatura máxima y mínima más largas y fiables de la cordillera, y su posterior control de calidad y análisis de homogeneidad. A partir de estas series se han calculado las tendencias (período común 2002-2025) y determinado diferencias en la evolución térmica en tres franjas altitudinales. Los resultados preliminares muestran la existencia del EDW a escala anual, estacional y mensual.

Palabras clave: Pirineos, Cambio Climático, Análisis de Tendencias Calentamiento dependiente de la altitud.

ABSTRACT

Within the framework of the LIFE-SIP Pyrenees4Clima project (2024–2031), actions are being developed to detect and analyze elevation-dependent warming in the Pyrenees, also known by the English term Elevation Dependent Warming (EDW). A central task is the compilation of the longest and most reliable series of maximum and minimum temperatures in the mountain range, followed by quality control and homogeneity analysis. Based on these series, trends have been calculated (common period 2002–2025) and differences in thermal evolution across three altitudinal bands have been determined. Preliminary results show the existence of EDW at annual,

seasonal, and monthly scales.

Key words: Pyrenees, Climate Change, Trend analysis, Elevation Dependent Warming

INTRODUCCIÓN

1.1. El contexto pirenaico

La cordillera de los Pirineos, que conecta la Península Ibérica con Europa y supera los 3000 m de altitud en su sector central, es especialmente sensible al cambio climático por su orientación oeste-este y la influencia combinada del Atlántico y el Mediterráneo Diversos proyectos europeos han cuantificado ya este cambio. Así, en el marco del proyecto LIFE-SIP Pyrenees4Clima (2024–2031) se ha confirmado un aumento térmico des de 1959 de 1,9 °C (de hasta 2,7 °C en verano), 20 días menos de helada y 32 días más de verano (OPCC, 2026). Estos cambios afectan profundamente a los recursos hídricos, al turismo y a la biodiversidad y, en la alta montaña, destacan el retroceso de la cubierta de nieve, el permafrost y los glaciares, con pérdidas recientes muy acusadas (Izagirre et al. 2024), que también repercuten en la seguridad de los excursionistas.

1.2. Objetivos del estudio

El objetivo es cuantificar la deriva térmica reciente en el Pirineo, con especial atención en la alta montaña, y evaluar si el calentamiento es más intenso que en cotas bajas, lo que permitiría confirmar la existencia de un calentamiento dependiente de la altitud, a semejanza del observado en otras cordilleras del planeta (Pepin et al. 2022). Asimismo, se busca relacionar este calentamiento con el retroceso de la cobertura nival, a partir de la definición de franjas altitudinales sensibles a dicha reducción.

METODOLOGÍA

2.1. Series meteorológicas

En las últimas décadas han aumentado las observaciones en alta montaña gracias a estaciones automáticas de organismos como el Servei Meteorològic de Catalunya (SMC), el Servei Meteorològic Nacional d'Andorra (SMA), la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) y Météo-France (MF), lo que ha mejorado la calidad y cobertura espacial y temporal en este ámbito. Aun así, la recopilación sigue siendo laboriosa, por la diversidad de fuentes y formatos, y porqué la continuidad está a menudo condicionada a las condiciones meteorológicas adversas en las estaciones ubicadas a más altitud. Finalmente, se han seleccionado un total de 25 series diarias de temperatura máxima (TX) y mínima (TN), para el período extremo 1991-2025 y para el sector del Pirineo central, comprendido entre el Pirineo oriental aragonés, occidental catalán, Andorra y el sector equivalente en la vertiente francesa (figura 1).

Esta zona incluye algunos de los techos pirenaicos, entre ellos el Aneto (3404 m).



Figura 1. Mapa con la localización de los observatorios utilizados para el estudio, y dentro de los límites del área pirenaica definido por la Comunidad de Trabajo de los Pirineos (CTP). Fuente: elaboración propia.

2.2. Control de calidad y homogeneización de series

Las series seleccionadas han sido sometidas a un control de calidad (CC) por parte de los respectivos servicios meteorológicos. No obstante, el método de homogeneidad seleccionado, ACMANTv6, incorpora también su propio CC, especialmente en la detección de valores fuera de rango (Domonkos, 2025). ACMANTv6 es un método de homogeneización relativo automático para detectar y corregir puntos de discontinuidad en series climáticas. Compara cada serie con estaciones cercanas y bien correlacionadas, lo que mejora la detección de rupturas y su ajuste. Se trata de uno de los métodos más precisos para la identificación de inhomogeneidades (Guijarro et al. 2023).

2.3. División por franjas altitudinales

Tras las pruebas preliminares realizadas en Esteban et al. (2026) y siguiendo el criterio de Sigró et al. (2024), que ya identificaba una señal significativa de EDW separando en dos franjas por encima y por debajo de los 1500 m, en este estudio las estaciones se han agrupado en tres rangos altitudinales: <1500 m, 1500–2200 m y >2200 m. Estas franjas se corresponden, respectivamente, con sectores de nieve escasa y episódica, sectores habitualmente innivados, pero en claro retroceso y con elevada variabilidad interanual, y sectores que aún mantienen una cobertura nival persistente durante la temporada invernal (López-Moreno et al., 2022).

RESULTADOS

3.1. Calidad de datos y series seleccionadas

El proceso de homogeneización aplicado a las series de TX y TN (1991-2025) ha permitido identificar un promedio de entre 1 y 2 puntos de ruptura por serie, siendo la

magnitud media del ajuste anual alrededor de 0,5 en valor absoluto. Por ello, el impacto de la homogeneización sobre la tendencia es limitado, si se compara con los datos sin homogeneizar. A pesar de que ACMANTv6 permite el relleno de datos faltantes, esto se ha desestimado para el período previo a 2002, por la falta de una buena cobertura de series en las tres franjas altitudinales indicadas. Así pues, para el período 2002-2025, se han seleccionado un total de 22 series, distribuidas en 10 por debajo de 1500 m, 5 entre 1500 y 2200 m y 7 por encima de 2200 m.

3.2. Tendencia en función de franjas altitudinales

La tendencia anual, estacional y mensual se ha evaluado mediante regresión lineal, aplicando la prueba no paramétrica de Mann-Kendall para determinar la significación estadística para un nivel de confianza del 95%.

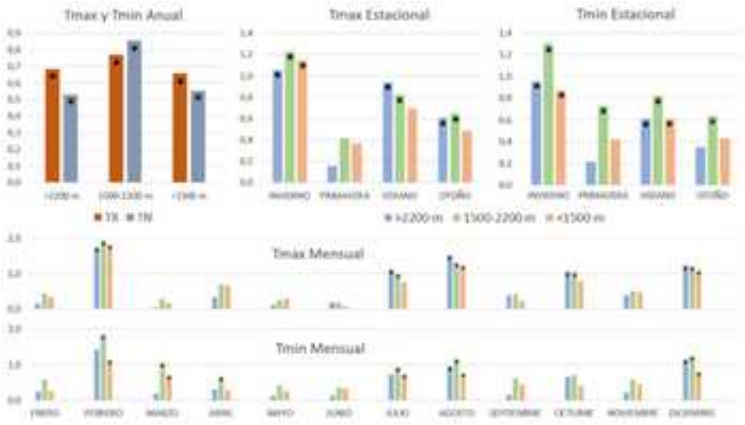


Figura 2. Tendencias para la TX y TN en función de las diferentes franjas altitudinales y temporales. Asterisco indica estadísticamente significativa. Fuente: Propia

Los resultados del periodo 2002–2025 evidencian un incremento significativo tanto de la TX como de la TN en el conjunto del Pirineo, siendo la franja altitudinal intermedia (1500-2200 m) la que muestra un calentamiento más intenso, especialmente en invierno y para la TN (figura 2). Así, en esta franja y período, el incremento en esta variable se fija en 1,31 ºC/dec, mientras que es de 0,87 ºC/dec y 0,95 ºC/dec para las franjas inferior y superior, respectivamente. En las cotas más elevadas (>2200 m) el calentamiento es también significativo, pero con una magnitud inferior a la reportada en franjas intermedias, destacando la tendencia de la TX estival: 0,94 ºC/dec. En las cotas bajas (<1500 m) las tendencias son más moderadas. El análisis mensual (figura 2, cuadro inferior), muestra un incremento muy destacado de la TX y TN en los meses invernales de diciembre y, sobre todo, febrero con valores que superan ampliamente los 1,5 ºC/dec. También son apreciables las tendencias positivas en los meses de julio y agosto. El análisis por vertientes no revela diferencias significativas entre los ámbitos norte y sur del Pirineo.

DISCUSIÓN

En las últimas décadas, han podido consolidarse las redes transnacionales de estaciones meteorológicas ubicadas en el Pirineo y en altitudes superiores a los 2000 m. Los esfuerzos para aglutinar estos datos ya nos permiten avanzar en el análisis del calentamiento dependiente de la altitud (EDW), ya documentado en otros macizos como los Alpes, y que ahora empezamos a caracterizar también en el ámbito pirenaico. Así, es posible determinar que, más allá de constatar su existencia, aparecen matices altitudinales y estacionales sobre los cuales hay que seguir ahondado con más series de datos y con mayor cobertura temporal. Los cambios evidentes reportados en la franja intermedia (1500-2200m) resaltan la importancia de la nieve como “driver” del EDW, al ser este intervalo altitudinal el que más está experimentando el retroceso del manto nival. Aun así, es relevante destacar la necesidad de disponer de más series en este estrato, para confirmar las tendencias identificadas. En esta línea, para profundizar en el estudio del fenómeno, en 2025 se desplegaron nuevos transectos instrumentados con sensores de temperatura y humedad en el Pirineo central (Bonabé y Panticosa), siguiendo las recomendaciones de la Unified High Elevation Observing Platform (Pepin et al. 2024), y que cubren un gradiente altitudinal de 1500 a más de 3000 m (figura 3). En fases posteriores, la investigación abordará también la relación del EDW con la circulación atmosférica y la influencia de la cubierta nival en las tendencias de calentamiento.



Figura 3. Estación tipo FLOAT a 2.500 m (izquierda) y ANCHOR a 1.700 m (derecha) en el transecto de Bonabé, Pirineo Catalán, según la denominación fijada por la Unified High Elevation Observing Platform. Fuente: SMC

CONCLUSIONES

En el marco del proyecto LIFE-SIP Pyrenees4Clima (2024–2031), este trabajo presenta las investigaciones en curso destinadas a detectar el calentamiento dependiente de la altitud (EDW) en los Pirineos y a identificar sus principales factores explicativos. El análisis de tendencias basado en series climáticas de alta montaña de Andorra, España y Francia ofrece resultados prometedores que confirman y ayudan a caracterizar este fenómeno en las dos últimas décadas, y animan continuar el análisis para reforzar su solidez.

REFERENCIAS

Domonkos, P. (2025). Homogenization of the Probability Distribution of Climatic Time Series: A Novel Algorithm. Atmosphere 2025, 16, 616. https://doi.org/10.3390/atmos16050616

Esteban, P., Prohom, M., Cateura, J., López-Moreno, J.I., Cunillera, J. (2026). Elevation-dependent warming in the Pyrenees: Observed trends, new elevational transects and drivers' detection. Snowhydro Conference, Jaca 2-6 February 2026.

Guijarro, J.A., López, J.A., Aguilar, E., Domonkos, P., Venema, V.K.C., Sigró, J., Brunet, M. (2023): Homogenization of monthly series of temperature and precipitation: Benchmarking results of the MULTITEST project. Int. J. Climatol., 43, 3994–4012

Izagirre, E., Revuelto, J., Vidaller, I., et al. (2024): Pyrenean glaciers are disappearing fast: state of the glaciers after the extreme mass losses in 2022 and 2023. Reg Environ Change 24, 172. https://doi.org/10.1007/s10113-024-02333-1

López-Moreno, J.I., Soubeyroux, J.M., Gascoin, S. et al. (2020). Long-term trends (1958–2017) in snow cover duration and depth in the Pyrenees. Int J Climatol.;40:6122–6136. https://doi.org/10.1002/joc.6571

OPCC (2026). Boletín de Indicadores de Cambio Climático de los Pirineos, 2024. Observatorio Pirenaico de Cambio Climático. https://opcc-ctp.org/herramientas/boletin-climatico-biccpir/

Pepin, N. C., Arnone, E., Gobiet, A., Haslinger, K., Kotlarski, S., Notarnicola, C., et al. (2022). Climate changes and their elevational patterns in the mountains of the world. Reviews of Geophysics, 60, e2020RG000730. https://doi. org/10.1029/2020RG000730

Pepin, N.C., Beneš, J., Masiokas, M., Steiner, J., Thornton, J.M. & Williamson, S. (2024). Proposal for the Unified High Elevation Observational Platform (UHOP). Mountain Research Initiative & GEO Mountains. doi: 10.48620/77051.

Sigró, J., Cisneros, M., Pérez-Luque, A.J., Pérez-Martínez, C., Vegas-Vilarrubia, T. (2024): Trends in temperature and precipitation at high and low elevations in the main mountain ranges of the Iberian Peninsula (1894–2020): The Sierra Nevada and the Pyrenees. Int. J. Climatol. 44(9) 2897-2920. https://doi.org/10.1002/joc.8487

ORGANIC CARBON IN COASTAL SEDIMENTS AND BLUE CARBON ESTIMATION AT TWO SITES IN THE CANARY ISLANDS: A PRELIMINARY APPROACH

Jose R. SIERRA-SALCEDO[1], David GONZÁLEZ-SANTANA[1], J. Magdalena SANTANA-CASIANO[1], Melchor GONZÁLEZ-DÁVILA[1], Aridane G. GONZÁLEZ[1]

[1]Instituto de Oceanografía y Cambio Global (IOCAG), Universidad de Las Palmas de Gran Canaria (ULPGC), Las Palmas de Gran Canaria, Spain.

jose.sierra@ulpgc.es (J.S.), david.gonzalezsantana@ulpgc.es (D.G.), magdalena.santana@ulpgc.es (M.S.), melchor.gonzalez@ulpgc.es (M.G.), aridane.gonzalez@ulpgc.es (A.G.)

RESUMEN

Los sebadales son reconocidos como ecosistemas de carbono azul debido a su capacidad para almacenar carbono orgánico total (COT) en los sedimentos. Este estudio evalúa la variabilidad espacial del carbono orgánico en sedimentos asociados a Cymodocea nodosa y en áreas arenosas no vegetadas adyacentes en dos zonas de las Islas Canarias: El Pajar (Gran Canaria) y Abades (Tenerife). Se analizaron sedimentos superficiales (0–2 cm) y testigos (hasta 16 cm) mediante los métodos Walkley-Black (WB) y pérdida por ignición (LOI). Los resultados muestran que los valores de COT obtenidos mediante LOI fueron más de un 80% superiores a los estimados con WB. La aplicación de un factor de recuperación específico (0.915) redujo las estimaciones de COT en aproximadamente un 16% respecto al factor convencional. No se observó correlación entre el carbono en la biomasa y el carbono sedimentario, lo que sugiere un fuerte control de factores hidrodinámicos y propiedades del sedimento. Los stocks de carbono estimados oscilaron entre 49.20 y 88.07 t CO2 ha^{-1}, con un valor económico aproximado entre 3,652.61 y 6,583.76 € ha^{-1} (2023–2025). Estos resultados destacan la importancia de los sedimentos de sebadales y áreas adyacentes como sumideros de carbono.

Palabras clave: Carbono azul, sedimentos marinos, sebadales, carbono orgánico, Islas Canarias

ABSTRACT

Seagrass meadows are recognized as important blue carbon ecosystems due to their capacity to trap and store total organic carbon (TOC) in sediments. This study evaluates the spatial variability of sedimentary organic carbon in Cymodocea nodosa meadows and adjacent unvegetated areas at two sites in the Canary Islands (El Pajar, Gran Canaria; and Abades, Tenerife). Surface sediments (0–2 cm) and sediment

cores (down to 16 cm) were analyzed using the Walkley–Black (WB) method and Loss on Ignition (LOI). Results showed that LOI-derived TOC values were more than 80% higher than those obtained using WB. The application of a locally determined recovery factor (0.915) for WB reduced TOC estimates by approximately 16% compared to the conventional factor. No significant correlation was found between seagrass biomass carbon and sedimentary TOC, suggesting that hydrodynamic conditions and sediment characteristics play a dominant role in carbon accumulation. Estimated sedimentary carbon stocks ranged between 49.20 and 88.07 t CO2 ha^{-1}, with an associated economic value between approximately €3,652.61 and €6,583.76 ha^{-1} based on recent carbon market prices (2023–2025). These findings highlight the relevance of seagrass sediments and adjacent unvegetated areas as carbon sinks.

Key words: Blue carbon, seagrass meadows, sediment organic carbon, carbon stock, Canary Islands

INTRODUCTION

Los ecosistemas costeros son fundamentales para la adaptación y mitigación al cambio climático (Lovelock et al., 2020). En este caso, los sebadales desempeñan un papel clave en el secuestro de carbono azul (Hilmi et al., 2021). En el contexto del carbono azul, el carbono orgánico total (COT) sedimentario constituye una variable clave, ya que permite estimar la contribución potencial de estos ecosistemas como reservorios de carbono. Aunque ocupan una fracción reducida del fondo marino, estos hábitats pueden actuar como reservorios de carbono a medio y largo plazo, especialmente cuando las condiciones ambientales favorecen la deposición y conservación de la materia orgánica. Por ello es fundamental conocer también factores físicos y biogeoquímicos en cada área de estudio, incluyendo la hidrodinámica, la granulometría y la procedencia del material orgánico (Samper-Villarreal et al., 2016). En las Islas Canarias, Cymodocea nodosa constituye la especie dominante de sebadales, con una relevancia significativa en el almacenamiento de COT en sedimentos superficiales, además de un servicio ecosistémico destacado como zona de refugio, alimentación y reproducción (Espino et al., 2008). A pesar de su importancia, existe una limitada cuantificación del carbono almacenado en sus sedimentos y del papel de áreas adyacentes sin vegetación. El objetivo de este estudio es cuantificar el COT en sedimentos superficiales y en profundidad, comparar metodologías analíticas y estimar el stock de carbono y su valor económico potencial.

METHODS

Este trabajo se ha realizado en dos zonas de Canarias, como modelo piloto, El Pajar (Gran Canaria) y Abades (Tenerife). En cada zona se muestrearon sedimentos en dos hábitats: sebadal y área no vegetada adyacente (arenal). Se recolectaron muestras

superficiales (0–2 cm) y testigos de sedimento (hasta 16 cm), seccionados cada 2 cm, siguiendo protocolos estándar de carbono azul (Howard et al., 2014). Las muestras fueron analizadas mediante dos métodos: Walkley-Black (WB) (Walkley & Black, 1934; Jackson, 1958) y Pérdida por Ignición (LOI) (Heiri et al., 2001). El stock de carbono se expresó en t CO_2 ha^{-1} y se estimó su valor económico utilizando precios del mercado de carbono de los años 2023-2025 (Howard et al., 2014).

RESULTS

Las muestras de sedimentos superficiales analizadas mostraron patrones temporales diferentes entre las dos zonas de estudio (Figura 1). En El Pajar, el COT medio estimado fue de 0.176 ± 0.057% por WB (Figura 1a), mientras que el COT obtenido mediante LOI (Figura 1b) fue de 0.928 ± 0.108%, mostrando una baja diferenciación entre los sedimentos vegetados y los adyacentes.

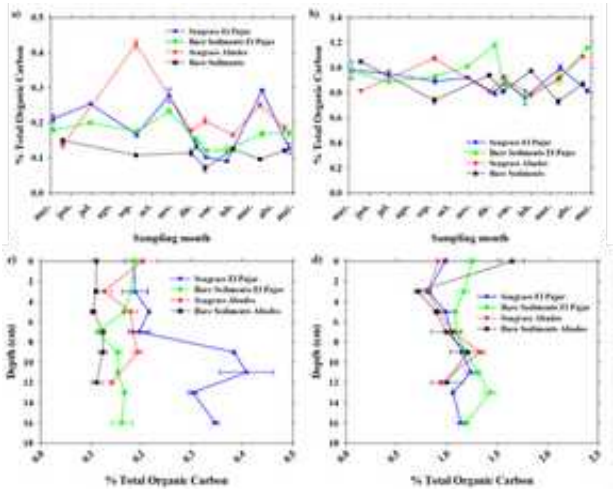


Figura 1. Contenido de carbono orgánico total (COT) en sedimentos de El Pajar y Abades. (a) superficiales con método WB, (b) superficiales con LOI, (c) testigos con WB y (d) testigos con LOI.

En Abades, los sedimentos de sebadales y los de la zona de arenal presentaron patrones temporales contrastantes en el contenido de carbono orgánico total a lo largo del periodo de estudio. El COT medio en los sedimentos de sebadales, determinado mediante WB (Figura 1a), fue de 0.221 ± 0.089%, mientras que en los sedimentos no vegetados fue de 0.112 ± 0.023%. En el caso del método LOI (Figura 1b), los valores de COT fueron similares entre hábitats, con medias de 0.915 ± 0.116% en sebadales y 0.873 ± 0.112% en el arenal.

En los testigos de sedimento, se observaron variaciones verticales del contenido de carbono orgánico en ambos sitios. En El Pajar, el valor máximo de COT determinado mediante WB (Figura 1c) se registró en los sebadales en la capa de 10–12 cm (0.409

± 0.053%). En Abades, el máximo se localizó en los sebadales en la capa de 0–2 cm (0.201 ± 0.030%). Mediante el método LOI (Figura 1d), el valor máximo en El Pajar se observó en la zona de arenal en la capa de 12–14 cm (1.432 ± 0.053%). En Abades, el máximo se registró igualmente en la capa de 0–2 cm (1.648 ± 0.115%).

DISCUSSION

El COT sedimentario en sistemas dominados por C. nodosa presenta una marcada dependencia del contexto local. La comparación entre El Pajar y Abades muestra que la presencia de sebadal no genera necesariamente el mismo patrón de acumulación en todas las localidades, lo que sugiere que las condiciones locales son determinantes para el almacenamiento de carbono en zonas costeras. Es destacable la concentración de COT almacenado en arenales circundantes a la zona de producción de carbono de sebadales. Las praderas marinas pueden exportar parte de la materia orgánica que producen o retienen, y esta puede depositarse posteriormente fuera del límite estricto del sebadal. Esto implica que el almacenamiento de carbono debe tener en cuenta zonas de ecosistemas con sebadales, otras especies y además el almacenamiento en zonas adyacentes (Duarte & Krause-Jensen, 2017). Las diferencias entre métodos reflejan limitaciones inherentes a cada técnica y la necesidad de establecer un protocolo de medida para las zonas de estudio. El método WB tiende a infraestimar el carbono debido a la oxidación incompleta, mientras que LOI puede sobreestimarlo por la pérdida de compuestos no orgánicos (Pribyl, 2010).

A partir de los valores hallados, los stocks de carbono estimados (49.20 y 88.07 t CO_2 ha^{-1}) corresponden a un valor económico aproximado de 3,652.61 y 6,583.76 € ha^{-1}, lo que sugiere, de forma preliminar, el potencial papel de los sebadales como sumideros de carbono.

CONCLUSIONS

El COT sedimentario en zonas costeras con presencia de Cymodocea nodosa varía entre localidades, hábitats y profundidades. Aunque los resultados tienen carácter preliminar dado el reducido número de localidades analizadas, los sedimentos asociados a C. nodosa constituyen un importante sumidero de carbono en las Islas Canarias, y los sedimentos no vegetados adyacentes también pueden contener cantidades relevantes de COT, por lo que deberían integrarse en las estrategias de acción climática y conservación de carbono azul. La selección del método analítico influye significativamente en las estimaciones de carbono, siendo necesaria la calibración local.

ACKNOWLEDGMENTS

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto Multi-Coast (TED 2021-130892B-100) por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y la Unión Europea "NextGenerationEU"/PRTR. Los análisis también han sido financiados por el proyecto IMPLACOST (1/MAC/2/2.4/0009), dentro del Programa de Cooperación Territorial INTERREG VI Madeira-Azores-Canarias MAC 2021-2027.

REFERENCES

Duarte, C. M., & Krause-Jensen, D. (2017). Export from seagrass meadows contributes to marine carbon sequestration. In *Frontiers in Marine Science* (Vol. 4, Issue JAN). Frontiers Media S. A. https://doi.org/10.3389/fmars.2017.00013.

Espino, F., Tuya, F., Blanch, I., & Haroun, R. Los sebadales de Canarias. Oasis de vida en los fondos arenosos,Gobierno de Canarias, p. (2008).

Heiri, O., Lotter, A. F., & Lemcke, G. (2001). Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results. In *Journal of Paleolimnology* (Vol. 25). https://doi.org/10.1023/A:1008119611481.

Hilmi, N., Chami, R., Sutherland, M. D., Hall-Spencer, J. M., Lebleu, L., Benitez, M. B., & Levin, L. A. (2021). The Role of Blue Carbon in Climate Change Mitigation and Carbon Stock Conservation. In *Frontiers in Climate* (Vol. 3). Frontiers Media S.A. https://doi.org/10.3389/fclim.2021.710546.

Howard, J., Hoyt, S., Isensee, K., Telszewski, M., & Pidgeon, E. (Eds.). (2014). *Coastal blue carbon: Methods for assessing carbon stocks and emissions factors in mangroves, tidal salt marshes, and seagrasses* (180 p.). Conservation International; Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO; International Union for Conservation of Nature.

Jackson, M. L. (1958). *Soil chemical analysis*. Prentice-Hall.

Lovelock, C. E., & Reef, R. (2020). Variable Impacts of Climate Change on Blue Carbon. In *One Earth* (Vol. 3, Issue 2, pp. 195–211). Cell Press. https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.07.010.

Pribyl, D. W. (2010). A critical review of the conventional SOC to SOM conversion factor. In *Geoderma* (Vol. 156, Issues 3–4, pp. 75–83). https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.02.003.

Samper-Villarreal, J., Lovelock, C. E., Saunders, M. I., Roelfsema, C., & Mumby, P. J. (2016). Organic carbon in seagrass sediments is influenced by seagrass canopy complexity, turbidity, wave height, and water depth. *Limnology and Oceanography*, *61*(3), 938–952. https://doi.org/10.1002/lno.10262.

Walkley, A., & Black, I. A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science, 37*, 29–38.

A DATA-DRIVEN METHODOLOGY FOR URBAN-RURAL CHARACTERIZATION USING HEAT STRESS INDICES

Carmen RODRÍGUEZ-RUMAYOR[1], Ana CASANUEVA[1], Yaiza QUINTANA[2], Javier DIEZ-SIERRA[2], Joaquín BEDIA[1]

[1] *Departamento de Matemática Aplicada y Ciencias de la Computación (MACC), Universidad de Cantabria, Santander, Spain*
[2] *Instituto de Física de Cantabria (IFCA), CSIC-Universidad de Cantabria, Santander, Spain*

rodriguezmac@unican.es, ana.casanueva@unican.es, yaizaqr@ifca.unican.es, javier.diez@unican.es, joaquin.bedia@unican.es

ABSTRACT

The Urban Heat Island (UHI) effect emerges when cities become significantly warmer than their surroundings. Typically defined as the temperature contrast between urban and rural locations, estimating the UHI remains challenging due to unclear boundaries along the urbanization spectrum. This study aims to provide an urban-rural characterization of meteorological stations based on long-term thermal behaviour. To address the need for human-centered approaches under intensifying heat extremes threatening population well-being, this study examines the Urban Heat Stress Island (UHSI), an extension of UHI beyond temperature, using multi-variable heat stress indices. Here, both UHI and UHSI are assessed for summer nights (when the contrasts peak) with sub-daily meteorological observations (1980-2017) from ten Paris stations.

A decision-based methodology relying on pairwise station comparisons is applied, allowing for UHI/UHSI computation without predefined urban-rural labels. Station relationships are inferred via threshold and aggregated through a reward-penalty system, yielding a relative urban-rural ranking per index. The consistency of the ranking across heat stress indices was evaluated, assessing the robustness of the station characterization. Rather than enforcing a binary classification, this approach highlights an urbanization gradient, including an extensive peri-urban “grey zone” with transitional characteristics. This ranking is not intended as an absolute urban-rural classification, but rather a climatologically-grounded, data-driven measure of relative heat stress behaviour. It complements land-cover-based approaches and urban parameterizations, and provides practical guidance for selecting reference locations in UHI/UHSI analyses when explicit definitions are unavailable.

Key words: Urban Heat Island, heat stress, urban climate, FPS-URB-RCC, meteorological observations.

INTRODUCTION

Climate change is expected to intensify temperature extremes and heat spells, making urban areas and thus, their populations, particularly vulnerable (IPCC, 2023; Wouters et al., 2017). This has direct impacts on public health and labour productivity, highlighting the need for human-centered methodologies (Casanueva et al., 2020). A key driver of this increased urban heat exposure is the Urban Heat Island (UHI) effect, a phenomenon that describes the systematic warming of urban areas relative to their rural surroundings, due to specific features of the urban matrix (Oke et al., 1991).

Quantifying the UHI requires selecting urban and rural reference locations. Here, we propose a data-driven approach that uses observed thermal behaviour to infer the degree of urbanization of each station relative to each other, yielding a continuous ranking along an urban-rural spectrum without imposing a binary classification.

However, human thermal discomfort is not determined by temperature alone. In fact, relative humidity, wind speed and radiation also strongly modulate heat perception. We therefore extend the analysis to the Urban Heat Stress Island (UHSI), calculated analogously to the classic UHI but replacing temperature with a heat stress index I: UHSI = I@urban - I@rural. A variety of indices is considered, as different formulations capture distinct aspects of thermal discomfort with different sensitivities to their input variables (Buzan et al., 2015), allowing us to compare the station rankings across indices. The analyzed indices include apparent and effective temperature, humidex, discomfort index, Wet Bulb Temperature, the Universal Thermal Climate Index, and multiple formulations of the heat index and Wet Bulb Globe Temperature.

DATA

The analysis relies on sub-daily observations from ten meteorological stations provided by Météo-France (https://meteofrance.com), located in the Paris area: Orly, Bretigny-SAPC, Melun, Roissy, Toussus-le-Noble, Villacoublay, Chartres, Saint-Maur, Trappes and Paris-Montsouris. The period covers January 1980 to December 2017, with hourly resolution from 1990 onwards; observations for the first decade (1980-1989) are available at 3-hourly resolution. Recorded variables include air temperature, relative humidity, wind speed and global solar radiation, with a varying proportion of missing values. The observational dataset is framed within the CORDEX Flagship Pilot Study on URBan environments and Regional Climate Change (Langendijk et al., 2024).

Since observations present heterogeneous temporal resolutions across stations and variables, the dataset was subsampled to a uniform 3-hourly timestep, thus maximizing the temporal coverage of the analysis.

METHODS

When computing the UHSI, rather than assuming predefined urban or rural labels, station thermal behaviour is inferred from pairwise differences. For each heat stress index and every possible AB pair of stations, differences were computed at each time step. To emphasize extremes, the daily maximum absolute contrast was retained, preserving the original sign to maintain the directional relationship between stations. In order to retain clear urban-rural thermal signals, the UHSI was filtered to nighttime hours (21:00, 00:00, 03:00 and 06:00 UTC) and summer months (June-August), conditions when UHI is usually the strongest. Station relationships were classified using a threshold-based criterion applied to the distribution of daily contrasts. For each heat stress index and station pair, the proportion of positive and negative values was computed. Pairs with over 75% of positive contrasts were classified as A>B, and pairs where more than 75% were negative as B>A; otherwise, there was no dominant station and the relationship was considered unclear.

From these pairwise classifications, a cumulative dominance score was assigned to each station through a reward-penalty system: each win contributed +1 and each loss -1 to the station's score. Due to missing radiation data at four locations, UTCI and WBGT (sun) could not be computed at these stations. Therefore, in order for fair comparison, scores were converted into relative ranks normalized by the number of stations available per index, yielding a value in [0,1] with lower values indicating more urban-like behaviour.

The consistency of the classification across indices was assessed by summarizing each station’s relative ranks using their mean and standard deviation. Thus, stations with a consistently low mean rank and low variability (SD < 0.125) were classified as urban, while those with a consistently high rank and low variability were considered rural.

RESULTS Y DISCUSSION

Figure 1 shows the relative rank of each station per heat stress index, where lower values indicate more urban-like thermal behaviour. Paris-Montsouris and Saint-Maur consistently rank as the most urban stations across all indices, while Chartres, Toussus-le-Noble and Melun rank as the most rural. The remaining stations show intermediate and more variable rankings, forming an extensive peri-urban grey zone with transitional thermal characteristics.



Figure 1. Station urban ranking per heat stress index.

CONCLUSIONS

This study extends the traditional temperature-based UHI concept by incorporating a battery of heat stress indices, specifically targeted for human discomfort and accounting for the combined effects of temperature, humidity, wind and radiation. The relative consistency of station rankings across indices supports the robustness of the proposed data-driven characterization of rural/urban sites, while the presence of an extensive “grey zone” of mixed rural-urban interface highlights the limitations of binary

urban-rural definitions and the convenience of a continuous ranking. The proposed framework complements land-cover based classifications and offers methodological guidance for UHI and UHSI analyses when explicit urban-rural distinctions are unavailable, with particular relevance for human-centred urban climate assessments.

ACKNOWLEDGMENTS

This work is part of Grant PID2023-149997OA-I00 (PROTECT) funded by MICIU/AEI/10.13039/501100011033 and ERDF/EU. C. R. R. acknowledges support from Grant PREP2023-001919 funded by MICIU/AEI/10.13039/ 501100011033 and ESF+.

REFERENCES

Buzan, J. R., et al. (2015). Implementation and comparison of a suite of heat stress metrics within the Community Land Model version 4.5. *Geoscientific Model Development, 8*, 151–170. https://doi.org/10.5194/gmd-8-151-2015

Casanueva, A., et al. (2020). Escalating environmental summer heat exposure—a future threat for the European workforce. *Regional Environmental Change, 20*(2), 40. https://doi.org/10.1007/s10113-020-01625-6

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2023). *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009157896

Langendijk, G. S., et al. (2024). Towards better understanding the urban environment and its interactions with regional climate change—The WCRP CORDEX Flagship Pilot Study URB-RCC. *Urban Climate, 58*, 102165. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2024.102165

Oke, T. R., et al. (1991). Simulation of surface urban heat islands under "ideal" conditions at night. Part 2: diagnosis of causation. *Boundary-Layer Meteorology, 56*, 339–358.

Wouters, H., et al. (2017). Heat stress increase under climate change twice as large in cities as in rural areas: A study for a densely populated midlatitude maritime region. *Geophysical Research Letters, 44*(17), 8997–9007. https://doi.org/10.1002/2017GL074889

PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LAS ZONAS DE BAJAS EMISIONES (ZBE) SOBRE LA SALUD DE LA POBLACIÓN PERIFÉRICA VULNERABLE

Miguel Ángel PADILLA MARCOS[1], Lida MERCADO MARTÍN[1], Iván GARCÍA COBO[2]

[1] *Department of Building Technologies. Architecture School. Universidad de Valladolid*
[2] *Department of Computer Science. Computer Engineering School. Universidad de Valladolid*

miguelangel.padilla@uva.es, lida.mercado.uva.es, ivan.garcia.cobo@uva.es

RESUMEN

Los riesgos para la salud asociados al clima derivan de la exposición a fenómenos meteorológicos extremos, contaminantes atmosféricos y ruido, lo que evidencia efectos sinérgicos que agravan enfermedades nuevas o preexistentes. Asimismo, la implantación de Zonas de Bajas Emisiones desplaza el tráfico más contaminante hacia periferias ya degradadas, con menor capacidad de dispersión de contaminantes y peores condiciones constructivas, favoreciendo su infiltración en las viviendas, empeorando la salud de las poblaciones más vulnerables y generando una clara inequidad ambiental y un problema de Justicia Climática. El objetivo principal consiste en definir una metodología para evaluar cómo las estrategias de Cambio Climático orientadas a mitigar sus efectos sobre la población pueden generar impactos negativos en la salud pública. La metodología parte de la hipótesis de que el diseño urbano y arquitectónico influye en la salud mediante la transferencia de contaminantes ambientales nocivos procedentes de la intensificación del tráfico en áreas periféricas. Para ello, integra el análisis de datos climáticos, densidad y patrones de tráfico, diseño urbano, edificación y salud pública. Se ha diseñado una encuesta de perfiles de uso para identificar casos de interés. La caracterización del entorno construido y las condiciones de las viviendas permite analizar el impacto sobre la salud de los contaminantes ambientales derivados del desplazamiento del tráfico.

Palabras clave: salud, movilidad, diseño, entorno edificado, vulnerabilidad.

ABSTRACT

Climate-associated health risks stem from exposure to extreme weather events, atmospheric pollutants, and noise, evidencing synergistic effects that exacerbate new or pre-existing diseases. Likewise, the implementation of Low Emission Zones displaces the most polluting traffic to already degraded peripheries with reduced

pollutant dispersion capacity and poorer construction conditions, promoting infiltration into homes, worsening health in vulnerable populations, and generating environmental inequity and Climate Justice issues. The main objective is to define a methodology to assess how Climate Change strategies aimed at mitigating their effects on the population may produce negative impacts on public health. The methodology is based on the hypothesis that urban and architectural design influences health through the transfer of harmful environmental pollutants from intensified traffic in peripheral areas. It integrates analysis of climatic data, traffic density and patterns, urban design, building characteristics, and public health. A usage profile survey has been designed to identify cases of interest. The characterization of the built environment and housing conditions enables analysis of the health impact of environmental pollutants arising from traffic.

Key words: health, mobility, urban design, built environment, vulnerability.

INTRODUCCIÓN

El cambio climático ha intensificado los fenómenos extremos, como olas de calor más severas y prolongadas, episodios meteorológicos fuera de estación e inundaciones, generando una nueva situación de adaptación obligada. Las ciudades concentran buena parte de los impactos climáticos de la sociedad contemporánea. La configuración del entorno urbano dificulta la circulación del aire y altera la capa límite atmosférica, lo que reduce la capacidad de dispersión de contaminantes antropogénicos y naturales. Estos proceden principalmente del tráfico, la climatización de edificios y las industrias próximas. La combinación entre efectos térmicos del Cambio Climático y la obstrucción del viento en el medio urbano favorece el estancamiento de contaminantes dentro de las poblaciones.

En consecuencia, los ciudadanos están expuestos a altos niveles de contaminación aérea y a episodios de calor y frío extremos, con efectos negativos sobre su calidad de vida y, especialmente, sobre su salud. Como medida de mitigación, se han implantado zonas de bajas emisiones (ZBE), que restringen el acceso de los vehículos más contaminantes en los centros urbanos. Sin embargo, su delimitación espacial excluye a áreas residenciales donde se concentra población más vulnerable. Esta vulnerabilidad depende de factores urbanos, arquitectónicos, socioeconómicos, sanitarios y de justicia climática. El objetivo de este trabajo radica en proponer un modelo metodológico replicable para identificar los condicionantes urbanos y arquitectónicos que influyen en la salud de la población residente en áreas vulnerables afectadas por medidas de mitigación del Cambio Climático, como las ZBE.

METODOLOGÍA

La metodología propuesta establece criterios comunes para evaluar la calidad ambiental en entornos vulnerables, identificando sus impactos sobre la salud pública. Se centra en definir actividades de investigación que generen perfiles identitarios de las comunidades afectadas, partiendo de la hipótesis de que el diseño urbano, arquitectónico y constructivo facilita la transferencia de contaminantes ambientales nocivos hacia el interior de las viviendas. Esto agrava la vulnerabilidad en zonas periféricas afectadas por el desplazamiento del tráfico tras la implantación de ZBE. Se estructura en tres fases:

1. Evaluar los efectos en la salud de los ciudadanos expuestos a contaminantes ambientales en las zonas de interés, monitoreando la emisión, la transmisión, la exposición y la persistencia.
2. Identificar los parámetros de tráfico, diseño urbano y arquitectura que más impactan la emisión y la persistencia de contaminantes.
3. Recopilar datos ambientales (calor, partículas y gases contaminantes, ruido) vinculados al estudio de salud pública.

2.1. Ámbito de actuación

Se propone una metodología replicable en diversos entornos urbanos y climáticos, independientemente de sus características específicas.

- **2.1.a. Caracterización del entorno urbano:** se evaluaron diversos indicadores de vulnerabilidad urbana en Valladolid, seleccionando el barrio de La Rondilla. Este entorno residencial presenta bajo índice socioeconómico, perfil obrero y situación limítrofe-externa a la ZBE.



Figura 1. (a)Barrio "la Rondilla". Fuente: maps.google.com; (b)límites ZBE, Valladolid. Fuente: zbe.valladolid.es.

- El barrio La Rondilla se caracteriza por edificios residenciales de hasta 5 alturas (años 50-70) en pabellones rectangulares. Queda delimitado por: polígono industrial (norte), río Pisuerga (oeste), barrio España (este, también vulnerable) y ZBE central (sur). Presenta alta Movilidad Urbana en la calle Rondilla de Santa Teresa (límite sur), donde circulan vehículos sin restricciones de etiqueta, marcando la frontera sociocultural/económica de Valladolid. Cuenta con escasos refugios climáticos accesibles, siendo área de vulnerabilidad urbana.

- **2.1.b. Vulnerabilidad urbana:** tras seleccionar la zona de intervención, se evalúan parámetros urbanos clave: espacios verdes, corredores, densidad y flujos de tráfico entre ZBE y área de estudio. Esto genera información geográfica y condiciones límite para analizar el diseño urbano, su influencia en la emisión/persistencia de contaminantes, y la ubicación de sensores. La selección se basa en un análisis FODA (Fortalezas, Oportunidades, Debilidades, Amenazas), que facilita la delimitación de áreas. Este enfoque asegura la recopilación eficiente de datos, la transferibilidad a otros entornos vulnerables y la replicabilidad en contextos metropolitanos. El flujo de tráfico se monitorea con GPS en vehículos contaminantes (etiquetas B/C), especialmente en zonas vulnerables. Estos datos alimentan modelación CFD tridimensional para simular dinámica de estancamiento/dispersión de contaminantes a distintas alturas, empleando métodos numéricos (Navier-Stokes) con convergencia garantizada según COST Action 732. Finalmente, se integran elementos de diseño urbano con resultados de simulaciones y análisis estadístico para identificar factores clave en la dispersión de contaminantes.

2.2. Estudio clínico/sanitario

El equipo de profesionales sanitarios incluye especialistas en neumología, medicina interna y psicología (psicoacústica), médicos de familia y enfermeros. Identifican casos en consultas, atención primaria o urgencias para reclutar pacientes con sintomatología compatible. El objetivo es correlacionar la condición médica inicial con contaminantes del tráfico que penetran en el entorno residencial, afectando al paciente y convivientes. Se recopila información familiar para clasificar impactos poblacionales, incluyendo variables como género, etnia, edad, ingresos, educación, residencia, dimensión familiar, actividades socioculturales, dieta, discapacidades, consumo de alcohol/tabaco/vapeo/drogas, y percepciones sobre calidad de vida, salud, ruido, tráfico y contaminación aérea. El análisis estadístico emplea la prueba de Pearson, descartando correlaciones <0,3. Para evaluar el agravamiento de la salud por desplazamiento del tráfico en zonas vulnerables, al menos el 20% de la muestra procede de casos de referencia en ZBE, sometidos a pruebas y seguimientos idénticos.

2.3. Muestreo urbano

Se propone instalar sensores en transectos móviles sobre autobuses urbanos de bajas emisiones, siguiendo rutas repetitivas que cubran ZBE y áreas de estudio. Estos registran contaminantes del tráfico, temperatura radiante de carreteras y fachadas, con geolocalización en tiempo real para correlacionar contaminación con olas de calor/frío y mapear puntos críticos. Complementan estaciones fijas en exteriores/interiores de viviendas y puntos estratégicos de las rutas: 2 en extremos, 1 intermedia, 1 en entorno de estudio. Permiten autocalibración, validación cruzada y cobertura completa de trayectos.

2.4. Ensayos en viviendas

Los sensores interiores se instalan en espacios habitables de mayor uso; los exteriores, cerca de ventanas o aberturas de ventilación/iluminación. Los datos se ordenan cronológicamente y analizan estadísticamente para evaluar el impacto de contaminantes exteriores en la calidad del aire interior y sus efectos sanitarios en participantes. La transmisión de contaminantes a través de la envolvente se mide experimentalmente con ensayo BlowerDoor (UNE-EN-ISO 9972:2019), sonómetro y cámara acústica. En modo infiltración tipo A (90-120 Pa), se cuantifica la infiltración/exfiltración por defectos constructivos durante 3 minutos, midiendo contaminantes interior/exterior simultáneamente. Niveles interiores inferiores indican fuentes internas predominantes.

2.5. Análisis estadístico

Los datos de los equipos de medición se someterán a análisis matemático-estadístico, integrando contaminación ambiental (atmosférica y acústica) con datos de salud, diseño urbano, caracterización de viviendas y efectos de olas de calor/frío. Estos conjuntos generarán modelos predictivos matemáticos entrenables y validables para elaborar mapas de riesgos sanitarios. Estos modelos apoyarán estrategias de intervención en otros entornos urbanos, fundamentando medidas para mitigar los efectos del tráfico sobre la salud.

RESULTADOS

El trabajo ha desarrollado una metodología para evaluar el impacto de las medidas de mitigación del cambio climático sobre la salud, particularmente en comunidades vulnerables de entornos urbanos, afectadas por estrategias ZBE.

CONCLUSIONES

La salud de los ciudadanos más vulnerables se ve afectada negativamente por las medidas urbanas de mitigación del cambio climático porque: (1) el cambio climático supone un riesgo para la salud pública que impulsa estrategias como las ZBE; (2) el tráfico más contaminante se desplaza de centros urbanos a periferias donde residen poblaciones vulnerables; (3) estas áreas presentan entornos construidos deficientes que las definen como zonas de vulnerabilidad urbana; y (4) las viviendas tienen envolventes, sistemas energéticos y condiciones de habitabilidad/salubridad inadecuadas que facilitan la entrada de contaminantes nocivos por el aumento del tráfico derivado de las ZBE.

REFERENCIAS

Analitis, A., De' Donato, F., Scortichini, M., Lanki, T., Basagana, X., Ballester, F., & Astrom, C. (2018). Synergistic effects of ambient temperature and air pollution on health in Europe: Results from the PHASE Project. International Journal of Environmental Research and Public Health, 15(9), 1856.

Beshir, H. A., & Fichera, E. (2025). "And Breathe Normally": Impacts of low emission zones on sick leave and mental well-being. Journal of Economic Behavior & Organization, 234, 106994.

Blandin, L., Bouscasse, H., & Mathy, S. (2025). Assessing the ex-ante impacts of a low-emission zone on transport poverty and vulnerability with the VulMob indicator. Case Studies on Transport Policy, 19, 101308.

Broster, S., & Terzano, K. (2025). A systematic review of the pollution and health impacts of low emission zones. Case Studies on Transport Policy, 19, 101340.

Carrere, J., Peralta, A., Oliveras, L., López, M. J., Marí-Dell'Olmo, M., Benach, J., & Novoa, A. M. (2021). Energy poverty, its intensity and health in vulnerable populations in a Southern European city. Gaceta Sanitaria, 35(5), 438-444.

Chamberlain, R. C., Fecht, D., Davies, B., & Laverty, A. A. (2023). Health effects of low emission and congestion charging zones. The Lancet Public Health, 8(7), e520-e529.

Gómez-Losada, A., & Pires, J. C. M. (2024). Air quality assessment during the low emission zone implementation in Madrid (Spain). Urban Climate, 55, 101995.

Harlan, S. L., & Ruddell, D. M. (2011). Climate change and health in cities: Impacts of heat and air pollution and potential co-benefits from mitigation and adaptation. Current Opinion in Environmental Sustainability, 3(3), 126-134.

Hassan, A. M., ELMokadem, A. A., Megahed, N. A., & Eleinen, O. M. A. (2020). Urban morphology as a passive strategy in promoting outdoor air quality. Journal of Building Engineering, 29, 101204.

Hu, X. (2025). Systematic Review and Meta-Analysis of the Association between Environmental Noise Exposure and Depression and Anxiety Symptoms in Community-Dwelling Adults. Noise Health, 27(127), 320-332.

Jiang, Z., Cheng, H., Zhang, P., & Kang, T. (2021). Influence of urban morphological parameters on the distribution and diffusion of air pollutants: A case study in China. Journal of Environmental Sciences, 105.

Joopaka, A. K., Jangam, R. V., & Ali, S. A. (2023). Psychiatric Impact of Noise Pollution in Urban Areas: A Cross-Sectional Study. Journal of Contemporary Clinical Practice, 9(2), 52-58.

Kurmanbekova, M., Du, J., & Sharples, S. (2025). A Review of Indoor Air Quality in Social Housing Across Low- and Middle-Income Countries. Applied Sciences, 15, 1858.

Leivo, V., Kempe, M., & Haverinen-Shaughnessy, U. (2025). Long-term impacts of energy retrofits on indoor air quality and climate – Follow-up results of a sample of Finnish apartment buildings. Indoor Environments, 2(3), 100116.

Lopez-Aparicio, S., Grythe, H., Drabicki, A., Chwastek, K., Toboła, K., Górska-Niemas, L., Kierpiec, U., Markelj, M., Strużewska, J., Kud, B., & Santos, D. S. (2025). Environmental sustainability of urban expansion: Implications for transport emissions, air pollution, and city growth. Environment International, 196, 109310.

Mkhize, N. (2025). Regulatory Effects of Urban Green Spaces on Residents' Health Under the Background of Climate Change: A Cross - Climate Zone Study. Environmental and Human Health, 1(1).

Nazish, A., Abbas, K., & Sattar, E. (2024). Health impact of urban green spaces: A systematic review of heat-related morbidity and mortality.

Nieuwenhuijsen, M. J. (2024). Climate crisis, cities, and health. The Lancet, 404(10463), 1693-1700.

Ofremu, G. O., Raimi, B. Y., Yusuf, S. O., Dziwornu, B. A., Nnabuife, S. G., Eze, A. M., & Nnajiofor, C. A. (2025). Exploring the relationship between climate change, air pollutants and human health: Impacts, adaptation, and mitigation strategies. Green Energy and Resources, 3(2), 100074.

Park, S. H., & Lee, P. J. (2025). Effects of noise on health-related quality of life: The roles of outdoor noise, indoor noise, and noise sensitivity. Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology.

Qin, P., Ricci, A., & Blocken, B. (2025). CFD simulation of pollutant dispersion in a street canyon with realistic car sources: The potential of green infrastructure configurations. Urban Climate, 62, 102544.

Tominaga, Y., Wang, L., Zhai, C., & Stathopoulos, T. (2023). Accuracy of CFD simulations in urban aerodynamics and microclimate: Progress and challenges. Building and Environment, 243, 110723.

Ulpiani, G., Hart, M. A., Di Virgilio, G., & Maharaj, A. M. (2022). Urban meteorology and air quality in a rapidly growing city: Inter-parameter associations and intra-urban heterogeneity. Sustainable Cities and Society, 77, 103553.

WHO. (2025, July 16). The synergies of heat stress and air pollution and its health consequences. World Health Organization Technical Report Series.

Yang, W., & Jeon, J. Y. (2020). Design strategies and elements of building envelope for urban acoustic environment. Building and Environment, 182, 107121.

Zhang, H., Evangelopoulos, D., Wood, D., Chatzidiakou, L., Varaden, D., Quint, J., de Nazelle, A., Walton, H., Katsouyanni, K., & Barratt, B. (2025). Estimating exposure to pollutants generated from indoor and outdoor sources within vulnerable populations using personal air quality monitors: A London case study. Environment International, 198, 109431.

EVALUACIÓN DEL RIESGO BIOMETEOROLÓGICO EN ESPAÑA POR SITUACIONES DE HIPOXIA E HIPEROXIA ATMOSFÉRICA

Benjamín ARROQUIA-CUADROS[1], Ricardo ALMENDRA[2], Angel MARQUÉS-MATEU[3], Laura SEBASTIÁ[3], Pablo FERNÁNDEZ-ARROYABE[4]

[1] *Universidad Internacional de Valencia (VIU), c/ Pintor Sorolla 21 Valencia, 46002, Valencia*
[2] *Universidade de Coimbra*
[3] *Universitat Politècnica de València*
[4] *Universidad de Cantabria*

barroquia@universidadviu.com, ricardoalmendra85@gmail.com, amarques@cgf.upv.es, lsebastia@dsic.upv.es, pablo.fdezarroyabe@unican.es

RESUMEN

El objetivo del estudio consiste en validar estadísticamente la asociación teórica existente entre la variación interdiaria del oxígeno atmosférico y las admisiones hospitalarias por enfermedades respiratorias. Para ello se calcula el índice biometeorológico DOA que representa la densidad de oxígeno atmosférico, se hace un ajuste y análisis estadístico de series temporales mediante el uso de modelos DLNM, seguido de un metaanálisis de 47 provincias españolas. Los resultados muestran una clara asociación con un riesgo relativo de 1.47 (1.40-1.55) para el percentil 5 (-14.72g/m³ en DOA). Este estudio muestra que los cambios en la densidad del aire y su contenido de oxígeno, tiene implicaciones sobre la salud, lo que permite articular sistemas de alerta biometeorológicos que reduzcan el impacto en la morbi-mortalidad en eventos extremos.

Palabras clave: Oxígeno, Morbilidad, Salud Pública, Biometeorología.

ABSTRACT

The aim of this study is to statistically validate the theoretical association between interdiurnal variations in atmospheric oxygen and hospital admissions for respiratory diseases. To this end, the biometeorological DOA index, which represents atmospheric oxygen density, is calculated, followed by the adjustment and statistical analysis of time series using DLNM models and meta-analysis across 47 Spanish provinces. The results show a clear association between atmospheric hypoxia conditions and the number of admissions, with a relative risk of 1.47 (1.40-1.55) at the 5th percentile (−14.72 g/m³ in DOA). This study demonstrates that changes in air density and its oxygen content have implications for health, making it possible to

develop biometeorological warning systems that reduce the impact on morbi-mortality during extreme events.

Key words: Oxygen, Hospital Admissions, Public Health, Biometeorology

INTRODUCCIÓN

El oxígeno es un elemento fundamental y necesario en muchos procesos celulares, siendo el ser humano el que regula los niveles de oxígeno para evitar deficiencias en la falta o exceso a través de la homeostasis (Tretter et al., 2020). La proporción de oxígeno en la atmósfera es constante si bien, su contenido molecular puede variar dependiendo de la densidad del aire (L. Lecha Estela, 2019). Estudios realizados en diferentes regiones señalan una clara una asociación entre la variación interdiaria de la densidad de oxígeno en el aire (DOA) y diferentes patologías respiratorias y circulatorias (Fdez-Arroyabe & Lecha, 2008; L. B. Lecha Estela, 2018; Olcina & Martín, 2012). El objetivo principal de este estudio es la cuantificación del riesgo de la variación de DOA interdiario en diagnósticos de enfermedades respiratorias.

METODOLOGÍA

2.1. Datos

Para el desarrollo del análisis de riesgo se han seleccionado fuentes de datos meteorológicos desde el repositorio de CERRA (Schimanke et al., 2021) con el fin de calcular el índice DOA por provincias (L. B. Lecha Estela, 2018). La diferencia de DOA interdiaria puede corresponderse bien con situaciones de hipoxia atmosférica cuando hay un descenso, o bien de hiperoxia cuando hay un aumento del valor. Se han empleado los registros de las admisiones hospitalarias del CMBD correspondientes a las enfermedades del aparato respiratorio según la Clasificación Internacional de Enfermedades (CIE-10) y desglosadas por provincias para el periodo 2003 a 2014 para las 47 provincias peninsulares Españolas.

2.1. Análisis estadístico

El análisis estadístico de los datos se realiza en dos fases (Gasparrini et al., 2012): primero, ajuste de series temporales por cada provincia, y segundo, un meta-análisis del conjunto de provincias para obtener el riesgo relativo general. Para capturar el carácter no lineal de la respuesta de las variaciones de DOA se han ajustado los modelos con DLNM (Gasparrini et al., 2010), siendo posible de esta forma conocer el tipo de patrón que describe las admisiones hospitalarias. Los modelos de la primera etapa se ajustaron mediante regresiones de familia quasi-Poisson y se especificó una matriz de base cruzada con 21 días en la dimensión retardo. En la segunda etapa, se realizó un meta-análisis multivariado para agrupar las estimaciones provinciales y obtener un RR global. La selección del mejor modelo se fundamentó en la

comparación del AIC. Todo el análisis estadístico se ha implementado en código con el lenguaje R, con los packages dlnm y mixmeta.

RESULTADOS

La variable DOA interdiaria entre días vecinos, muestra eventos extremos de hipoxia con valores negativos con bajadas de -25 g/m³, y eventos de hiperoxia con 22 g/m³. La figura 1 muestra el Riesgo Relativo total o acumulado (RR) por cada valor del índice DOA representado en el eje de abscisas.

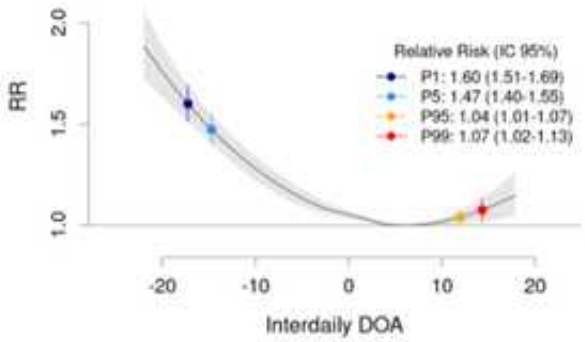


Figura 1: Riesgo Relativo acumulado para todas las provincias junto con percentiles extremos. Elaboración propia.

El riesgo se incrementa de forma progresiva según se acrecienta la hipoxia atmosférica, expresada como cambio en 24 horas del contenido de oxígeno del aire como se muestra en la Tabla 1. Por el contrario, las situaciones de hiperoxia representan un incremento del riesgo relativo mucho menor. En situaciones de hipoxia, correspondiente al percentil 5 o DOA -14.72 g/m³, el riesgo relativo es de 1.47 (1.40-1.55). En situaciones de hiperoxia, siendo el DOA 11.98 g/m³ en el percentil 95, el RR es 1.04 (1.01-1.07). El punto neutro o valor de mínimo RR se sitúa en 6.2 g/m³.

Percentil	DOA (g/m^3)	Riesgo Relativo
1	-17.24	1.60 (1.51-1.69)
5	-14.72	1.47 (1.40-1.55)
50	-4.68	1.13 (1.09-1.17)
95	11.98	1.04 (1.01-1.07)
99	14.33	1.07 (1.02-1.13)

Tabla 1: Valores de de la variación de DOA interdiario junto con el Riesgo Relativo de morbilidad asociado a enfermedades respiratorias. Fuente: elaboración propia.

Por otro lado, la Figura 2 muestra la distribución del RR sobre la variación del DOA y los retardos temporales hasta los 21 días. En eventos de hipoxia el mayor RR se concentra en 2 y 3 días posteriores y desciende progresivamente hasta el último retardo. En situaciones de hiperoxia el RR es menor y se observa en los primeros días un efecto protector.

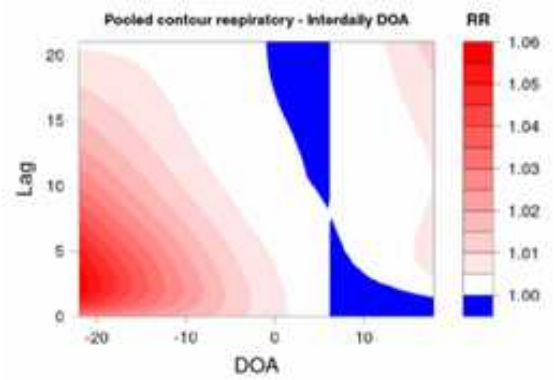


Figura 2: Distribución del RR por retardos de hasta 21 días sobre la variación de DOA interdiaria. Elaboración propia.

DISCUSIÓN

El estudio evidencia la relación entre eventos extremos de hipoxia atmosférica y el aumento en la atención sanitaria por enfermedades respiratorias. El mayor riesgo de asistencia sanitaria se concentra en los 5 días posteriores al evento extremo. En condiciones de hiperoxia, la asociación es menor. Estos resultados están alineados con estudios previos de DOA que relacionan la hiperoxia con un aumento en la asistencia sanitaria en pacientes por crisis hipertensivas o patologías previas de corazón (Fdez-Arroyabe & Lecha, 2008; L. B. Lecha Estela, 2018; Olcina & Martín, 2012). Los contrastes interdiarios de DOA puede tener un efecto fisiológico que aumente el riesgo en personas con patologías previas por una mala adaptación homeostática a las condiciones ambientales (Semenza, 2010). La modelización estadística aplicada ayuda a cuantificar y entender la distribución temporal del efecto del DOA, permitiendo ampliar el estudio a aplicaciones de alerta temprana basadas en predicciones meteorológicas (Fdez-Arroyabe et al., 2018), (Arroquia-Cuadros et al., 2021).

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos evidencian una asociación en los efectos de la variación del oxígeno en la atmósfera y las admisiones hospitalarias correspondientes con enfermedades respiratorias, siendo el RR en eventos extremos de hipoxia atmosférica mucho mayor que en eventos de hiperoxia. Este hallazgo epidemiológico ambiental tiene multitud de implicaciones, desde la perspectiva científica puede abrir una línea

de estudio que permita entender el efecto del estrés fisiológico o esfuerzo homeostático que provoca las situaciones de variación extrema de DOA.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos evidencian una asociación en los efectos de la variación del oxígeno en la atmósfera y las admisiones hospitalarias correspondientes con enfermedades respiratorias, siendo el RR en eventos extremos de hipoxia atmosférica mucho mayor que en eventos de hiperoxia. Este hallazgo epidemiológico ambiental tiene multitud de implicaciones, desde la perspectiva científica puede abrir una línea de estudio que permita entender el efecto del estrés fisiológico o esfuerzo homeostático que provoca las situaciones de variación extrema de DOA.

REFERENCIAS

Arroquia-Cuadros, B., Marqués-Mateu, Á., Sebastia, L., & Fdez-Arroyabe, P. (2021). A web-based support system for biometeorological research. *International Journal of Biometeorology*, *65*(8), 1313–1323. https://doi.org/10.1007/s00484-020-01985-y

Copernicus Atmosphere Monitoring Service. (2020). *CAMS global reanalysis (EAC4)*. https://doi.org/10.24381/d58bbf47

Fdez-Arroyabe, P., Lecha Estela, L., & Schimt, F. (2018). Digital divide, biometeorological data infrastructures and human vulnerability definition. *International Journal of Biometeorology*, *62*(5), 733–740. https://doi.org/10.1007/s00484-017-1398-x

Fdez-Arroyabe, P., & Lecha, L. (2008). Validación en el norte de España de dos sistemas de alerta sanitarios basados en la idea del contraste meteorológico extremo. En *Cambio climático regional y sus impactos. VI Congreso Internacional AEC*. Serie A, ponencia V. Tarragona 2008.

Gasparrini, A., Armstrong, B., & Kenward, M. G. (2010). Distributed lag non-linear models. *Statistics in Medicine*, *29*(21), 2224–2234. https://doi.org/10.1002/sim.3940

Gasparrini, A., Armstrong, B., & Kenward, M. G. (2012). Multivariate meta-analysis for non-linear and other multi-parameter associations. *Statistics in Medicine*, *31*(29), 3821–3839. https://doi.org/10.1002/sim.5471
Lecha Estela, L. (2019). *Pronósticos biometeorologicos*. Citmatel (ibd).

Lecha Estela, L. B. (2018). Biometeorological forecasts for health surveillance and prevention of meteor-tropic effects. *International Journal of Biometeorology*, *62*(5), 741–771. https://doi.org/10.1007/s00484-017-1405-2

Lyons, T. W., Reinhard, C. T., & Planavsky, N. J. (2014). The rise of oxygen in Earth's early ocean and atmosphere. *Nature*, *506*(7488), 307–315. https://doi.org/10.1038/nature13068

Olcina, J., & Martín, D. (2012). *Variations of oxygen in the air and its impact on human health*. *58*, 431–437.

Schimanke, S., Ridal, M., Le Moigne, P., & Berggren, L. (2021). *CERRA sub-daily regional reanalysis data for Europe on single levels from 1984 to present* [Dataset]. Climate Data Store. https://doi.org/10.24381/cds.622a565a

Semenza, G. L. (2010). Oxygen homeostasis. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Systems Biology and Medicine*, *2*(3), 336–361.

Tretter, V., Zach, M.-L., Böhme, S., Ullrich, R., Markstaller, K., & Klein, K. U. (2020). Investigating Disturbances of Oxygen Homeostasis: From Cellular Mechanisms to the Clinical Practice. *Frontiers in Physiology*, *11*. https://doi.org/10.3389/fphys.2020.00947

PLAN DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO DE SANTANDER: UN RECURSO PARA LA REDUCCIÓN DE LAS DESIGUALDADES URBANAS

Laura ASENSIO MARTÍNEZ[1], Lourdes GALINDO DELGADO[1], Francisco GARCÍA SÁNCHEZ[2], Cecilia RIBALAYGUA BATALLA[2]

[1]Escuela de Doctorado (EDUC); Universidad de Cantabria
[2]Dpto. de Geografía, Urbanismo y Ordenación del Territorio; Univ. de Cantabria

laura.asensio@alumnos.unican.es, lourdes.galindo@alumnos.unican.es, franciscojose.garcia@unican.es, cecilia.ribalaygua@unican.es

RESUMEN

El Plan de Adaptación al Cambio Climático de la ciudad de Santander (España) elaborado dentro del proyecto Santander Capital Natural (2023-2025), incorpora de manera directa las condiciones de vulnerabilidad social en el estudio de riesgos climáticos. En combinación con los mapas generados de exposición, se ha construido una base cartográfica a nivel de sección censal que permite detectar los ámbitos urbanos con un elevado riesgo. Un conjunto de indicadores distribuidos en tres ámbitos, condiciones socio-económicas, materiales y medioambientales, facilita la identificación de las secciones censales con mayor grado de vulnerabilidad dentro del municipio. Como resultado final del Plan se desarrolla un grupo específico de medidas de adaptación englobadas en la meta denominada Salud. Una parte importante de esta meta es reducir el riesgo de la población más sensible a las temperaturas extremas, como los ancianos, los niños pequeños y las personas con enfermedades crónicas. La meta Salud busca fortalecer la capacidad de respuesta y adaptación de la estructura urbana frente al cambio climático, reduciendo las desigualdades mediante la implementación de medidas de control y seguimiento del clima, la preparación para eventos climáticos extremos y la identificación y protección de grupos vulnerables.

Palabras clave: Adaptación, Cambio Climático, Exposición, Vulnerabilidad, Santander.

ABSTRACT

The city of Santander (Spain) and its Climate Change Adaptation Plan, developed as part of the Santander Capital Natural project (2023-2025), directly incorporates the conditions of social vulnerability in the study of climate risks. In combination with maps of exposure, a cartographic base has been built at the census section level. This

resource has allowed the detection of urban areas with a high risk to climate hazards. A set of indicators distributed in three areas, socio-economic, material and environmental conditions, facilitate the identification of census sections within the municipality area with the highest degree of vulnerability. A specific group of adaptation measures is developed as outcome encompassed in the Plan's goal called Health (Salud). An important part of this goal is to reduce the risk of most sensitive population to extreme temperatures, such as the elderly, young children and people with chronic diseases. Health goal seeks to strengthen the response and adaptation capacity of the urban structure, reducing inequalities through the implementation of climate control and monitoring measures, preparation for extreme weather events, and the identification and protection of vulnerable groups.

Key words: Adaptation, Climate Change, Exposure, Vulnerability, Santander.

INTRODUCCIÓN

El Plan de Adaptación al Cambio Climático de Santander, se desarrolla en el marco del proyecto Santander Capital Natural. El Plan se ha realizado con el apoyo científico de investigadores del Departamento de Geografía, Urbanismo y Ordenación del Territorio, liderados por el Grupo de Investigación CINCc (Ciudad, Infraestructuras y Cambio Climático) de la Universidad de Cantabria (UC), junto con la Fundación para la Investigación del Clima (FIC). El documento propone 85 medidas de adaptación a partir de la generación de robustos escenarios de clima futuro y un detallado cálculo del riesgo a las diferentes amenazas previsibles, basado en la exposición, vulnerabilidad y capacidad adaptativa de la ciudad y su población. En esta comunicación se presenta los resultados relacionados con los riesgos derivados de las temperaturas extremas.

METODOLOGÍA

Partiendo de los escenarios de clima futuro desarrollados por FIC, el estudio recoge la exposición (E) a las amenazas (A); inundaciones costeras y pluviales, así como los impactos de la subida de las temperaturas con los fenómenos de sequía y olas de calor. La integración de los resultados de los tres componentes anteriores (amenaza, exposición y vulnerabilidad) permite obtener el riesgo e impacto asociado a cada evento analizado. La relación general viene dada por la siguiente fórmula R = A x E x V conforme a lo reglado por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2022). El análisis de la vulnerabilidad incluye el estudio de la sensibilidad y capacidad adaptativa urbana en tres ámbitos básicos, sociedad, actividades económicas y medio ambiente, obteniendo resultados a escala de sección censal, que permiten identificar el riesgo en función de las diferentes amenazas analizadas. El conjunto de 23 indicadores de vulnerabilidad utilizados para el cálculo del riesgo por sección censal puede consultarse en el Plan (García et al., 2025).

RESULTADOS

Como resultado de la combinación de los datos de exposición y vulnerabilidad por sección censal se obtienen una serie de mapas que relacionan los riesgos derivados de las temperaturas extremas. El índice normalizado de riesgo por fenómenos de islas de calor urbanas diurnas compila todas las variables detectando que las áreas del sur del municipio, coincidentes con el sector portuario y secciones residenciales del centro, constituyen las zonas de mayor nivel de riesgo. En estas zonas confluyen diversos factores de riesgo, elevados porcentajes de población y, por lo general, varias condicionantes de sensibilidad humana y ambiental (Figura 1). Asociado a procesos de malestar general, problemas respiratorios, insolaciones, deshidratación o aumento del cansancio, estos sectores urbanos pueden tener impacto en el número de fallecimientos u hospitalizaciones por golpes de calor derivados de eventos de temperaturas extremas, principalmente para grupos de población de mayor edad. Otros fenómenos asociados agravan las consecuencias del cambio climático en las ciudades, por ejemplo, incrementando el número o intensidad de noches cálidas (tórridas o ecuatoriales).



Figura 1. Índice de Riesgo Islas de Calor Diurna. Fuente: CINCc (UC) - FIC.

Identificadas las secciones censales más expuestas y vulnerables a los episodios de olas de calor y elevadas temperaturas, el Plan establece el desarrollo de una meta específica relacionada con la salud. La Meta Salud se enfoca en mejorar la resiliencia de los servicios de atención médica y del sistema de vigilancia epidemiológica para proteger la salud de la población en un contexto de cambio climático. Para lograrlo, es necesario desarrollar mecanismos de control y seguimiento del cambio climático y su impacto en la salud pública, lo que supone establecer sistemas de monitoreo que permitan identificar y prever los riesgos asociados a eventos climáticos extremos y enfermedades relacionadas con el clima.

Es importante contar con la capacidad para actuar ante el clima extremo y sus efectos sobre la salud, lo que incluye la implementación de medidas de mitigación y

adaptación, así como la capacitación del personal médico y de emergencia para enfrentar situaciones de crisis relacionadas con el clima, como olas de calor, inundaciones o enfermedades transmitidas por vectores. Una parte importante de esta meta es reducir el riesgo de la población más sensible a las temperaturas extremas, como los ancianos, niños pequeños y personas con enfermedades crónicas. La implementación de programas de concienciación y prevención favorece la identificación y protección de grupos vulnerables, y la provisión de servicios de salud adecuados durante eventos climáticos adversos para estos sectores de población.

También, se busca minorar los condicionantes ambientales negativos que afectan a la salud pública, lo que permitiría abordar problemas como la contaminación del aire, la calidad del agua, la degradación de los ecosistemas y la exposición a sustancias tóxicas, que pueden agravarse con el cambio climático. Se deben implementar políticas y acciones para reducir estas amenazas ambientales y promover entornos más saludables y seguros para la población.

La Meta Salud busca fortalecer la capacidad de respuesta y adaptación del sistema de salud frente al cambio climático, mediante la implementación de medidas de control y seguimiento del clima, la preparación para eventos climáticos extremos, la protección de grupos vulnerables y la promoción de entornos saludables. Estas acciones son fundamentales para enfrentar los desafíos de salud pública en un entorno en constante cambio climático. Con un total de 20 medidas de adaptación específicas sobre gestión de zonas vulnerables relacionadas con la salud de la población más expuesta, se incorpora como una herramienta eficaz para la toma de decisiones frente a eventos extremos.

DISCUSIÓN

De la evaluación de riesgos identificados para la ciudad de Santander, la subida de temperaturas, especialmente las estivales, con la prolongación de las olas de calor, suponen las principales amenazas en un escenario de mayor frecuencia e intensidad de eventos extremos. Los niños de corta edad y los ancianos han sido identificados como los grupos de población más vulnerables. La combinación de estas situaciones, altas temperaturas y olas de calor, implica el riesgo más crítico relacionado con la salud pública. El Plan de Adaptación al Cambio Climático de Santander ha representado una gran oportunidad para trasladar los datos de exposición y vulnerabilidad a un entorno georrefenciado. La distribución espacial de la población afectada ha supuesto un enorme avance para la identificación de los barrios o secciones censales que presentan mayor grado de vulnerabilidad a estas amenazas.

Los mapas generados permiten identificar la distribución de los sectores vulnerables mostrándonos un panorama poco uniforme en relación con el impacto sobre la salud,

donde puede observarse áreas urbanas con mayor riesgo debido a condiciones desfavorables en la distribución de los espacios verdes, por la cantidad o calidad de los mismos, o debido a las condiciones constructivas de las edificaciones, con falta de adecuados aislamientos térmicos en las viviendas frente al soleamiento. El cruce de datos de población y condiciones socioeconómicas y materiales, ante una misma amenaza, muestra que la respuesta adaptiva es diferente. Así, en sectores con mayores equipamientos de espacios libres adecuadamente equipados y arbolados, las presiones que se ejerce sobre la población mayor o infantil son menores, diferenciándose claramente de las áreas susceptibles de convertirse es islas de calor urbano.

En este sentido, se comprueba claramente que una de las herramientas más eficaces para la gestión de la salud pública frente al cambio climático es la promoción de espacios verdes saludables asociados a la infraestructura azul (García, 2019), fuentes y otros espacios con agua en movimiento, mediante estrategias de renaturalización urbana que permita reducir el calor superficial. Todas estas intervenciones deben ser consecuentes con el control de alérgenos y vectores de enfermedades, mediante la plantación de especies arbóreas neutras en términos de salud respiratoria y con los adecuados seguimientos en la detección de insectos propagadores de enfermedades en fuentes y estanques. Igualmente, la creación de estos espacios tiene una segunda derivada como es la reducción de los ingresos hospitalarios por golpes de calor o patologías cardiorrespiratorias, no solo a los grupos de población más vulnerables sino también de forma generalizada al resto de la ciudadanía, especialmente aquellos que realizan trabajos en el exterior.

El Plan incide en las necesarias relaciones entre la ciencia del clima y el sistema sanitario, reforzando estrategias de actuación rápida y seguimiento permanente de los grupos de población identificados. Con la detección temprana de los elementos perturbadores relacionados con los umbrales críticos de temperatura y humedad, se propone un sistema de alerta temprana que permita mitigar los efectos que puedan producirse en estas situaciones. No obstante, la propuesta del Plan queda supeditada a la disposición de los recursos necesarios para la implementación de los servicios de vigilancia y alerta temprana, si bien, el documento establece las bases para de forma coordinada entre el Ayuntamiento y el servicio público de salud de la Comunidad Autónoma se identifique el mecanismo más adecuado para su gestión.

En el desarrollo participativo del Plan, los gestores relacionados con servicios sociales y sanitarios concretaron tres aspectos fundamentales que debía contener el documento. En primer lugar, se propone desarrollar un Laboratorio de Investigación Biometeorológica y de Salud Humana que estudie las relaciones entre los procesos atmosféricos y la salud y el bienestar de las personas. En segundo lugar, se considera necesario crear una red complementaria de observatorios de la calidad del aire, de

control de bio-aerosoles (con estaciones de captura de aero-alérgenos) para el monitoreo de emisiones contaminantes y nanopartículas a escala de sección censal. Y, por último, optimizar la red de sensores de Smart City para detectar en tiempo real los puntos críticos por elevada temperatura, prestando especial atención a las secciones censales más expuestas identificadas en el Plan de Adaptación.

A este respecto, conviene incidir en este punto, pues el proceso de participación ha permitido co-diseñar este Plan de Adaptación, tanto con personas expertas y actores clave locales, como con el conjunto de la ciudadanía. El proceso participativo ha estado presente a lo largo de todo el desarrollo del Plan. Desde el inicio, se ha sentado las bases de lo que era necesario estudiar para hacer un buen Plan de Adaptación, hasta el final del proceso en el que la ciudadanía ha intervenido para definir y priorizar las medidas de adaptación adecuadas.

CONCLUSIONES

El Plan de Adaptación al Cambio Climático de Santander ha supuesto una oportunidad para entender que la variabilidad climática en el contexto actual no es solo un problema de riesgos materiales, sino que tiene un impacto severo en la salud pública. Por tanto, la incorporación de la Meta Salud, con un total de 20 medidas propuestas no es un aspecto menor. Al integrar mapas de vulnerabilidad social con modelos climáticos, el Plan determina que la resiliencia no se logra solo con obras técnicas, sino garantizando que los ciudadanos más frágiles tengan acceso directo a refugios climáticos y entornos naturalizados que mitiguen el estrés térmico, en combinación con otras medidas de control y asistencia sanitaria. El conjunto de medidas propuestas se centra en reducir principalmente la morbilidad y la mortalidad frente a los eventos extremos futuros.

AGRADECIMIENTOS

Deseamos agradecer el apoyo de la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR), financiado por la Unión Europea – NextGenerationEU, con el que se ha desarrollado este proyecto.

REFERENCIAS

García, F. (2019). Planeamiento urbanístico y cambio climático: la infraestructura verde como estrategia de adaptación = Urban planning and climate change: green infrastructure as an adaptation strategy. CIUR, 122. https://doi.org/10.20868/ciur.2019.122.3870

García, F., Ribalaygua, C., Asensio, L. (Coord.) (2025). Plan de Adaptación al Cambio Climático. Santander Capital Natural. Madrid: Editorial Síntesis, 384 p.

IPCC (2022). Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

INDICADORES BIOCLIMÁTICOS DE LAS OLAS DE CALOR 2023-2024 EN SEIS ZONAS CLIMÁTICAS LOCALES DE LA CIUDAD DE XALAPA (MÉXICO)

Adalberto TEJEDA-MARTÍNEZ[1], Aranza E. BARUCH-VERA[2], Irving R. MÉNDEZ-PÉREZ[3]

[1]Grupo de Climatología Aplicada de la Universidad Veracruzana, 91090 Xalapa, Veracruz, México.
[2]Maestría en Ciencias de la Tierra de la Universidad Veracruzana, 91090 Xalapa, Veracruz, México.
[3]Centro de Ciencias de la Tierra de la Universidad Veracruzana, 91090 Xalapa, Veracruz, México.

atejeda.martinez@gmail.com, vera.aranza@gmail.com, menpez@gmail.com

RESUMEN

En 2023 y 2024 se registraron olas de calor que afectaron amplias zonas de México. Este trabajo evalúa el comportamiento de dichas olas en estaciones meteorológicas urbanas y suburbanas en la ciudad de Xalapa (México). Se evaluaron con tres indicadores bioclimáticos: el exceso sobre el valor del Humidex preferente, el margen de la temperatura de bulbo húmedo debajo del valor crítico para el enfriamiento por sudoración, y el vapor perdido por respiración. La intensidad de las olas de calor fue mayor durante la fase diurna en las estaciones suburbanas, mientras que las olas nocturnas fueran más intensas en las urbanas.

Palabras clave: olas de calor, bioclima humano, urbanización, México, zonas climáticas locales.

ABSTRACT

During 2023 and 2024, extensive regions of Mexico were affected by heatwaves. This paper evaluates the behavior of these events in urban and suburban meteorological stations at Xalapa City (Mexico) during this period. Heatwaves were evaluated using three bioclimatic indicators: the excess of the Humidex index over the preferred Humidex value, the margin between wet-bulb temperature and the critical threshold for evaporative cooling, and water vapor loss through respiration. The results show a higher intensity of diurnal heatwaves at suburban stations, contrasted with a greater nocturnal heatwave intensity in urban areas.

Key words: heatwaves, human bioclimate, urbanization, Mexico, local climate zones.

INTRODUCCIÓN

McGregor (2024) considera el estudio de las olas de calor como fundamental, ya que se trata de uno de los peligros naturales más silenciosos y letales. Los años 2023 y 2024 han sido los más cálidos de los 175 años de registros observacionales, con una anomalía media de +1,55 °C respecto a 1850–1900 (WMO, 2025). En México se rompieron récords de temperatura máxima en distintos puntos; por ejemplo, el 17 de mayo de 2024 en la Ciudad de México se alcanzaron 40,9 °C, mientras que en Xalapa (México) se registraron 36,6 °C el 7 de mayo de 2024 y un nuevo máximo histórico de 38,8 °C al día siguiente.

Se analizará el comportamiento de las olas de calor registradas en Xalapa durante 2023 y 2024 comparando seis estaciones meteorológicas ubicadas por debajo del dosel urbano con el índice Humidex (Cvijanovic et al., 2023), el margen por debajo de la temperatura de bulbo húmedo crítica y la pérdida de vapor por respiración. Tejeda-Martínez et al. (2025) encontraron en Puebla (México) que las olas nocturnas en el centro de la ciudad son más intensas, y que las zonas más vegetadas incrementan el disconfort del bioclima humano producido por las olas.

METODOLOGÍA

2.1 Área de estudio

La ciudad de Xalapa (19° 31′ 52″ N, 96° 54′ 57″ W, aproximadamente 1.400 msnm y 7 mil hectáreas) es la capital del estado de Veracruz, México. De 1991 a 2000 se registraron promedios anuales de temperatura de 19 °C y precipitación acumulada de 1.485 mm. La temperatura máxima promedio fue de 24,5 °C y la mínima promedio de 13,8 °C. El mes más cálido es mayo y el más frío es enero. Los meses más lluviosos son junio y septiembre, de modo que en el semestre mayo-octubre se acumula el 75% de la precipitación (Parada-Molina et al., 2017).

2.2 Datos

Se partió de los datos del Observatorio Meteorológico de Xalapa (OMX, 19° 30’ 43” N, 96° 54’ 14” W y 1.360 msnm) del Servicio Meteorológico Nacional. Se obtuvieron datos horarios de temperatura y humedad relativa para dos periodos denominados como OMX (serie larga 2000–2024) y X2000 (2023–2024). De la Dirección de Protección Civil Municipal de Xalapa, se seleccionaron cinco estaciones con al menos 70% de datos válidos de temperatura ambiente y humedad relativa del 1 de febrero al 30 de septiembre de 2023 así como de 2024 (Figura 1 y Tabla 1). Las pruebas de calidad y los procedimientos de imputación de datos faltantes se pueden ver en Baruch-Vera (2026). Las ZCL de las seis estaciones meteorológicas se presentan en la Tabla 1.

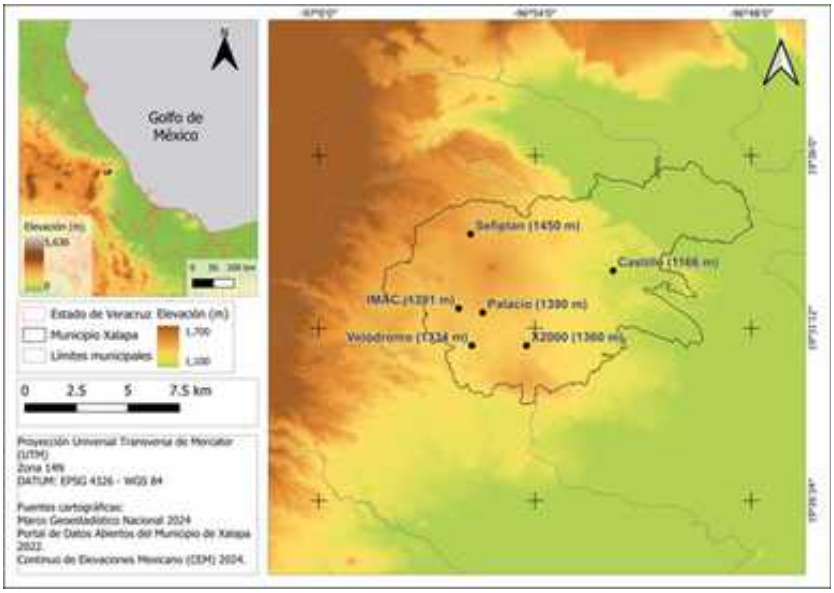


Figura 1. Área de estudio y ubicación de las estaciones meteorológicas utilizadas con sus elevaciones en msnm. X2000 pertenece al Servicio Meteorológico Nacional y el resto a la Dirección de Protección Civil Municipal. Elaboró René R. Gómez Díaz.

ZCL	Sefiplan 5_{AD}	IMAC 3_{BC}	Palacio 2_{BE}	X2000 6_{A}	Velódromo 5_{AE}	Castillo 3_{BC}
	Semi-urbana	Urbana	Urbana	Semi-urbana	Semi-urbana	Urbana
Textura						
Perfil de vegetación						

Tabla 1. Zonas climáticas locales (ZCL) según Stewart & Oke (2012), texturas y perfiles de vegetación de las seis estaciones meteorológicas en un radio de 200 m.

Se aplicó el criterio del ETCCDI, que establece que una ola de calor ocurre cuando se presentan al menos cinco días consecutivos con temperaturas superiores al percentil 90 de la climatología local (Zhang et al., 2011).

El percentil 90 de las temperaturas máximas (Tx90) se aplicó para detectar las olas diurnas; las nocturnas, a partir del percentil 90 de las mínimas diarias (Tn90). Si son diurnas y nocturnas en las mismas fechas se consideraron como circadianas o compuestas.

2.3 Humidex

La intensidad de las olas de calor en horas-grado sobre el Humidex preferente fue calculada adaptando la propuesta de Chen & Li (2017), como la suma por encima del umbral diurno o nocturno, según sea el caso. Las intensidades de las olas de calor diurnas (9 a 20 horas tiempo local) y nocturna (21 a 8 horas) en horas-grado se evaluaron como en Tejeda-Martínez et al. (2025):

$$\{HWD\} = \sum_{j=9}^{20\ horas} T_j - T_{x90'} \qquad \text{Ec. 1}$$

$$\{HWN\} = \sum_{j=21}^{8\ horas} T_j - T_{n90'} \qquad \text{Ec. 2}$$

La intensidad de la ola circadiana en horas-grado se calcula como {HWC} = {HWD} + {HWN} para las fechas en las que {HWD}≠0 y {HWN}≠0. El Humidex preferente (Tejeda-Martínez et al., 2025), se calculó partiendo de la temperatura preferente diurna y nocturna (Morgan & Gómez-Azpeitia, 2018), para el semestre cálido (abril–octubre). Las temperaturas preferentes máxima (TPx) y mínima (Tpn) son:

$$T_{Px} = 0,5\overline{T_x} + 13,1 \quad y \quad T_{Pn} = 0,5\overline{T_n} + 13,1 \qquad \text{Ecs. 3}$$

Las temperaturas preferentes TPx (25,4 °C) y TPn (21,1 °C) se emplearon para calcular el Humidex preferente diurno (HPx) y nocturno (HPn) con las correspondientes presiones de vapor en hectopascales a una humedad relativa del 50% (e50):

$$H_{Px} = T_{Px} + \frac{5}{9}\left(e_{50} - 10\right) = 28,7\,°C \qquad \text{Ec. 4}$$

$$H_{Pn} = T_{Pn} + \frac{5}{9}\left(e_{50} - 10\right) = 22,4\,°C \qquad \text{Ec. 5}$$

El disconfort humano en horas-grado diurno y nocturno se calcularon con el Humidex 〈HWD〉, para todo Hj > HPx, y 〈HWN〉, para todo Hj > HPn:

$$\langle HWD\rangle = \sum_{j=9}^{20\ horas} H_j - H_{Px} \quad y \quad \langle HWN\rangle = \sum_{j=21}^{8\ horas} H_j - H_{Pn} \qquad \text{Ecs. 6}$$

y para los casos circadianos 〈HWC〉 = 〈HWD〉 + 〈HWN〉 .

2.4 Temperatura del bulbo húmedo

La temperatura de bulbo húmedo proporciona información de la capacidad del cuerpo humano para enfriarse mediante la sudoración. Se calculó con el procedimiento propuesto por Tejeda-Martínez (1994) y Tejeda-Martínez et al. (2018), que consiste en despejar Tw de la ecuación del psicrómetro, quedando:

$$T_w = \left\{-\frac{Q}{2} + \left[\frac{Q^2}{4} + \frac{S^3}{27}\right]^{\frac{1}{2}}\right\}^{\frac{1}{3}} + \left\{-\frac{Q}{2} - \left[\frac{Q^2}{4} + \frac{S^3}{27}\right]^{\frac{1}{2}}\right\}^{\frac{1}{3}} - 1°C \qquad \text{Ec. 7}$$

$$S = 662,23 + 0,97p, \quad Q = 8264,65 - 1480,45\left(\frac{HR}{100}\right)e_s - 0,966\,pT$$

donde p es la presión atmosférica en hPa, HR es la humedad relativa en %, es es la presión de vapor de saturación en hPa y T es la temperatura ambiente en °C.

Se adoptó una temperatura crítica de bulbo húmedo (Twcrit) de 30,5 °C (Vecellio et al., 2022). El margen debajo de la Twcrit será ΔTwc, con la Tw observada cada hora (Twi):

$$\Delta T_{wc} = T_{wcrit} - T_w \qquad \text{Ec. 8}$$

2.5 Vapor perdido por respiración

Durante la respiración, el aire es exhalado aproximadamente a 37 °C con 100% de humedad relativa, equivalente a una humedad absoluta de 44 gm-3 (Tejeda-Martínez et al., 2018). Según Guyton & Hall (2022) en cada respiración el volumen de aire es de 0,5 litros (0,0005 m3); con 20 respiraciones por minuto en una hora se exhalan 0,6 m3 de aire. El VPR depende de la diferencia entre la humedad absoluta de los pulmones (ρw pulmones) de 44 g m-3 y la observada en el exterior (ρwi). En centilitros, para las olas diurnas y nocturnas será:

$$VPR_{diurno} = \sum_{i=9\,horas}^{20\,horas} \frac{(\rho_{w\,pulmones} - \rho_{wi})(0.6)}{10} \qquad \text{Ec. 9}$$

$$VPR_{nocturna} = \sum_{i=21\,horas}^{8\,horas} \frac{(\rho_{w\,pulmones} - \rho_{wi})(0.6)}{10} \qquad \text{Ec. 10}$$

RESULTADOS

Para la OMX 2000–2024 los umbrales resultaron Tx90 = 28,4 °C y Tn90 = 17,4 °C, y con ellos se detectaron siete episodios de ola de calor durante 2023 y 2024 (Tabla 2).

	Episodio	Ola diurna	Ola nocturna	Ola circadiana
2023	**I**	27/02 al 03/03	NO	NO
	II	11/06 al 23/06	09/06 al 20/06	11/06 al 20/06
2024	**III**	06/04 al 10/04	NO	NO
	IV	15/04 al 20/04	17/04 al 22/04	17/04 al 20/04
	V	25/04 al 10/06	01/05 al 09/06	01/05 al 09/06
	VI	NO	25/06 al 29/06	NO
	VII	NO	10/09 al 16/09	NO

Tabla 2. Episodios de olas de calor en el OMX 2023–2024.

Las estaciones de Palacio, IMAC y Castillo presentan los valores más elevados de suelo impermeable (98,0, 94,6 y 87,8 %), número de viviendas (379, 1339 y 702), de habitantes (667, 2980 y 2016) y establecimientos comerciales (255, 152 y 165) en 200 m a la redonda. Estas tres zonas son urbanas, con alta actividad humana y mayores fuentes de calor antropogénico. Palacio es la más urbana, pues en comparación con IMAC y Castillo presenta un menor porcentaje de arbolado.

En cambio, las zonas de Sefiplan, X2000 y Velódromo son semiurbanas y presentan menores fracciones de superficie impermeable (63,8, 69,4 y 51,2 %) y de establecimientos comerciales (menores de 50).

Las horas-grado por encima del Humidex preferente indican los excesos térmicos en combinación con el efecto de la humedad atmosférica. La Figura 2 muestra los resultados para el episodio de calor V, el más prolongado de los estudiados para esta contribución. En la Tabla 3 se muestran los valores de ΔTwc y VPR antes, durante y después del episodio V en la estación Palacio.

Las horas-grado de disconfort (por encima del Humidex preferente) de las olas nocturnas, especialmente en episodios extensos como el II y el V, permiten distinguir con mayor claridad los contrastes locales. Estos dependen principalmente de la altitud, la cobertura y composición de las edificaciones, así como de la presencia de vegetación y cañones urbanos. En las olas circadianas, las estaciones Palacio, Castillo y X2000 muestran condiciones térmicas más propicias para la acumulación de horas-grado por encima del umbral de las olas de calor.

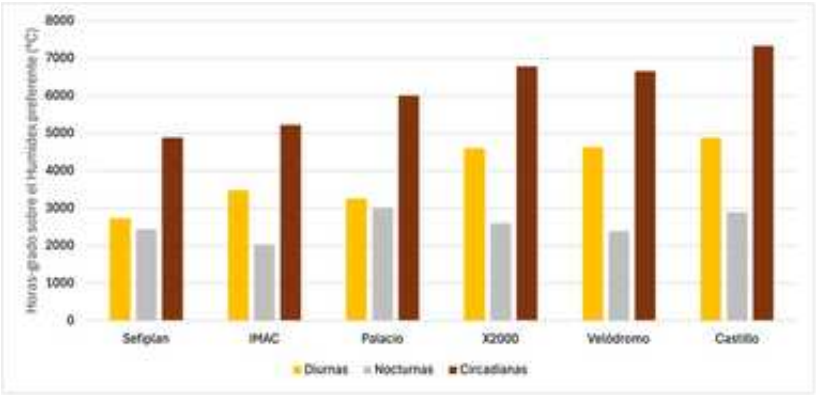


Figura 2. Olas de calor en horas-grado por encima del Humidex preferente (Y) para el episodio V. En el eje X se indican las estaciones meteorológicas.

	Antes (20 abril)	Durante (8 mayo)	Después (15 junio)
Twc	10	9.6	11.2
VPR	41	44	42

Tabla 3. Valores de Twc y VPR antes, durante y después de la ola V en Palacio.

Los tres indicadores lograron mostrar de manera consistente y complementaria la dinámica del estrés térmico humano, así como la modulación local ejercida por la morfología urbana.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En las cinco ZCL –correspondientes a las seis estaciones meteorológicas– las olas de calor mostraron un comportamiento claramente diferenciado por la morfología urbana: los tejidos abiertos y más verdes (X2000, Velódromo, Sefiplan) concentraron la intensidad diurna y circadiana, pero se enfriaron con mayor rapidez, mientras que las zonas compactas y de alta inercia térmica (Palacio, IMAC, Castillo) sostuvieron el calor nocturno. Las horasgrado confirmaron la mayor carga térmica diurna/circadiana en X2000 y la predominancia nocturna de Palacio; al incorporar humedad, las horasgrado de disconfort por encima del Humidex preferente desplazaron los máximos a Castillo, evidenciando el efecto combinado de urbanización y menor altitud.

AGRADECIMIENTOS

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (Secihti) de México por el apoyo para la presente investigación.

REFERENCIAS

Baruch-Vera, A. E. (2026). *Efectos de la urbanización en el comportamiento del bioclima humano durante las olas de calor 2023-2024 en Xalapa, Veracruz.* [Tesis de maestría, Universidad Veracruzana]. https://drive.google.com/file/d/129cWGApJFpxXP1nvXnwRLIeNLKiI7Apq/view?usp=sharing

Chen, Y.; Li, Y. (2017). An inter-comparison of three heat wave types in China during 1961–2010: Observed basic features and linear trends. Scientific Reports, 7(1), 45619. https://doi.org/10.1038/srep45619

Cvijanovic, I., Mistry, M.N., Begg, J., Gasparrini, A., & Rodó, X. (2023). Importance of humidity for characterization and communication of dangerous heatwave conditions. npj Climate and Atmospheric Science, 6, 33. https://doi.org/10.1038/s41612-023-00346-x

Guyton, A., & Hall, J. (2022). Compendio de fisiología médica (14 ed.). Madrid, España: Elsevier España.

INEGI. (2022). Inventario Nacional de Viviendas 2020: presentación. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. https://iieg.gob.mx/ns/wp-content/uploads/2022/08/Presentaci%C3%B3n-Inventario-Nacional-de-Viviendas-2020.pdf

INEGI. (2024). México en cifras: Área geográfica — Xalapa-Enríquez. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México en cifras: Área geográfica — Xalapa-Enríquez. https://www.inegi.org.mx/app/areasgeograficas/?ag=300870001#collapse-Resumen

McGregor, G. (2024). Heatwaves: Causes, Consequences and Responses. Springer Nature.

Morgan, N., & Gómez-Azpeitia, G. (2018). Development of a Mexican standard of thermal comfort for naturally ventilated buildings. En Rethinking comfort. Proceedings of 10th Windsor Conference (pp. 596–607). Windsor, Reino Unido: Brotas, L., Roaf, S., Nicol, J., & Humphreys, M.

Parada-Molina, P., Cerdán, C., Cervantes, J., Ortiz, G., & Barradas, V. (2017). ¿Está cambiando el clima en Xalapa y Coatepec? UVserva, 5, 59–63. https://doi.org/10.25009/uvs.v0i5.2573

Stewart, I. D., & Oke, T. R. (2012). Local climate zones for urban temperature studies. Bulletin of the American Meteorological Society, 93(12), 1879-1900. https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1

Tejeda-Martínez, A. (1994). On the evaluation of the wet bulb temperature as a function of dry bulb temperature and relative humidity. Atmósfera, 7(3), 179-184. https://www.revistascca.unam.mx/atm/index.php/atm/article/view/8370

Tejeda-Martínez, A., Méndez-Pérez, I., Báez-Vásquez, J., Luyando-López, E., Balderas-Romero, G., Conde-Álvarez, C., & Baruch-Vera, A. (2025). Intensities of the 2023 and 2024 heatwaves in different Local Climatic Zones of the city of Puebla (Mexico). Atmosfera, 39, 673-697. https://doi.org/10.20937/ATM.53476

Tejeda-Martínez, A., Méndez-Pérez, M., Rodríguez, N. C., & Tejeda-Zacarías, E. (2018). La humedad en la atmósfera. Bases físicas, instrumentos y aplicaciones. Universidad de Colima, Dirección General de Publicaciones (Formato digital). https://doi.org/978-607-8549-50-4

Vecellio, D., Wolf, S., Cottle, R., & Kenney, W. (2022). Evaluating the 35 C wet-bulb temperature adaptability threshold for young, healthy subjects (PSU HEAT Project). Journal of Applied Physiology, 132(2), 340-355. https://doi.org/10.1152/japplphysiol.00738.2021

WMO. (2025). State of the Global Climate 2024 (WMO-No. 1368). World Meteorological Organization. https://wmo.int/sites/default/files/2025-03/WMO-1368-2024_en.pdf

Zhang, X., Alexander, L., Hegerl, G.C., Jones, P., Tank, A.K., Peterson, T.C., Trewin, B. & Zwiers, F.W. (2011). Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, 2(6), 851-870. https://doi.org/10.1002/wcc.147

PATRONES DE PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA EN XALAPA, VERACRUZ (MÉXICO), CIUDAD CON UN CRECIMIENTO URBANO ACELERADO.

Carlos Manuel WELSH-RODRIGUEZ[1], Katia FERNANDEZ-GONZALEZ[2]
Sarhay VAZQUEZ-MELENDEZ[2] y Carolina Andrea OCHOA-MARTINEZ[1]

[1]*Centro de Ciencias de la Tierra. Universidad Veracruzana*
[2] *Maestría en Ciencias de la Tierra. Universidad Veracruzana*

cwelsh@uv.mx

RESUMEN

El crecimiento urbano en la ciudad de Xalapa, Veracruz (México) ha sido motivo de estudio desde diversas disciplinas, coinciden en que el impacto de dicho crecimiento ha alterado el clima local. El objetivo del trabajo es evaluar los posibles efectos de los cambios en la precipitación y la temperatura de la ciudad, utilizando datos de la nueva red de monitoreo del ayuntamiento de Xalapa, establecida en 2021 que registra cada 10 minutos datos en seis estaciones, instalada gracias a la cooperación entre diversas entidades. Se evaluó la intensidad de la isla de calor urbano (ICU) y el índice de concentración de la precipitación (ICP). Es necesario señalar que la topografía de la ciudad y su urbanización son factores de incidencia en el clima local. En primer lugar, se observó una ICU con una diferencia de valores urbanos nocturnos que oscilaron entre 1.7 y 2.5 °C. El ICP mostró que durante el verano hubo acumulados superiores a 600 mm, indicando lluvias abundantes pero distribuidas de manera uniforme, mientras que, para el invierno y la primavera, se registraron precipitaciones bajas, pero altamente concentradas, reflejando eventos intensos en pocos días, con episodios donde la precipitación estacional ocurrió en un lapso de 24hr, generando afectaciones graves a la población y a la ciudad. Los resultados son significativos de un cambio en la climatología local, aunado a la transformación urbana de Xalapa, condiciones que incrementan la vulnerabilidad.

Palabras clave: Crecimiento, climatología, variabilidad de temperatura y precipitación.

ABSTRACT

Urban growth in the city of Xalapa, Veracruz (Mexico) has been the subject of study across multiple disciplines, which concur that the impact of such growth has altered the local climate. This study aims to evaluate the potential effects of changes in precipitation and temperature in the city, using data from the new municipal monitoring network established by the Xalapa City Council in 2021. This network records data every 10 minutes across six stations, made possible through cooperation among

various entities. The Urban Heat Island (UHI) was assessed and the Precipitation Concentration Index (PCI) was employed. It is important to note that the city's topography and urbanization are key factors influencing the local climate. First, the presence of an UHI was observed, with nocturnal urban temperature differences ranging from 1.7 to 2.5 °C, while daytime differences decreased to values below 1.4 °C. The PCI on summer accumulations exceeded 600 mm, indicating abundant rainfall distributed relatively evenly. In contrast, winter and spring recorded lower precipitation totals but at higher concentrations, reflecting intense events occurring over a few days. In some cases, seasonal precipitation occurred within 24 hours, causing severe impacts on both the population and urban infrastructure. These results indicate a shift in local climatology, coupled with the ongoing urban transformation of Xalapa—conditions that contribute to increased urban vulnerability.

Key words: Urban growth, climatology, temperature and precipitation variability

INTRODUCCIÓN

El Sexto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) señala que el calentamiento de la atmósfera, el océano y la superficie terrestre debido a la influencia antropogénica es inequívoco. Se han observado cambios rápidos y generalizados en la atmósfera, el océano, la criosfera y la biosfera. Asimismo, el informe destaca que la magnitud de los cambios recientes en el sistema climático, así como el estado actual de muchos de sus componentes, no tienen precedentes en escalas temporales que abarcan desde varios siglos hasta miles de años (IPCC, 2021). En el caso particular de México, Estrada y colaboradores (2023) señalan que el incremento y la tasa de aumento de la temperatura media anual del aire son superiores al promedio global. No obstante, se destaca que dicho incremento presenta una marcada heterogeneidad espacial, con mayores aumentos en el norte y sureste del país. De igual manera, el aumento térmico no es homogéneo a lo largo del año, siendo más pronunciado durante otoño y primavera, y menor en invierno y verano. En cuanto a la precipitación, se ha identificado una modificación en su distribución estacional, con incrementos significativos durante verano y otoño.

1.1. Xalapa, Veracruz (MÉXICO)

La ciudad de Xalapa forma parte del municipio del mismo nombre y se localiza entre los paralelos 19°29' y 19°36' de latitud norte, y los meridianos 96°48' y 96°58' de longitud oeste. Su altitud oscila entre los 600 y 1 600 msnm (INEGI, 2025). La ciudad presenta una topografía escarpada y alberga el cerro Macuiltépetl (1 587 msnm). Asimismo, se encuentra dentro de la Faja Volcánica Transmexicana y posee un gradiente altitudinal que va de los 600 a los 1 720 msnm. De acuerdo con las normales climatológicas 1991–2020 del Servicio Meteorológico Nacional (SMN),

Xalapa registra una temperatura media anual de 18.9 °C, una temperatura máxima media de 24.5 °C y una mínima media de 13.8 °C. La precipitación anual promedio es de 1 485.4 mm, con máximos pluviométricos en junio y una estación seca durante invierno y primavera (INEGI, 2025). La vegetación original predominante correspondía a bosque mesófilo de montaña, bosque tropical caducifolio y bosque de galería (Rzedowski, 1978). Actualmente, la ciudad cuenta además con vegetación inducida en parques, jardines, camellones, áreas naturales y parques ecológicos, aunque con un evidente grado de fragmentación (Méndez-Romero, 2017).

1.2. Urbanización

La ciudad de Xalapa fue fundada como asentamiento en 1313 y declarada centro urbano en 1572. Su primer proceso importante de expansión ocurrió con la llegada del ferrocarril, periodo en el cual el crecimiento urbano estuvo condicionado por los límites topográficos de la ciudad. Durante la década de 1950, la población urbana se duplicó y la extensión territorial se triplicó. A finales de la década de 1960 comenzaron a ocuparse las zonas altas colindantes con el cerro Macuiltépetl, así como las áreas de inundación entre Xalapa y Banderilla. En la década de 1970 se registró una importante pérdida de vegetación original y la desaparición de espacios agrícolas. Hacia finales de la década de 1990, el crecimiento poblacional favoreció la expansión de zonas comerciales y el cambio de uso de suelo, promoviendo la construcción de avenidas y vialidades destinadas a conectar unidades habitacionales con áreas comerciales. A inicios del siglo XXI, la expansión urbana redujo al mínimo los remanentes de bosque dentro de la ciudad. Además, la construcción de espacios comerciales y habitacionales se desarrolló, en gran medida, sin incorporar áreas verdes capaces de proveer servicios ecosistémicos (Méndez-Romero, 2017). De acuerdo con datos del INEGI (2025), la población del área metropolitana supera los 750 mil habitantes.

Año	Espacio Urbano (Has)	Población (ciudad de Xalapa)
1980	3,000	212, 769
1990	4,000	288,464
2000	5,500	390,590
2010	6,400	457,928
2020	7,000	488,531

Tabla 1: Crecimiento en Xalapa. INEGI, 2025.

METODOLOGÍA

El análisis de la isla de calor urbana (ICU) en la ciudad de Xalapa se realizó mediante la estimación de la intensidad térmica urbano-rural, utilizando registros de temperatura del aire provenientes de una red de estaciones meteorológicas ubicadas dentro de la ciudad y en su zona periurbana, es importante señalar que la selección de sitios de las estaciones fue un proceso de diálogo entre organizaciones y el ayuntamiento para su instalación o en su caso cesión de los datos, como el caso de la universidad veracruzana. La isla de calor urbana se define como la diferencia térmica entre el ambiente urbano y un entorno rural con influencia mínima de urbanización, lo que permite cuantificar de manera directa el efecto térmico asociado al desarrollo urbano. Esta definición clásica fue propuesta por Oke (1982) y se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta T_{u-r} = T_u - T_r \quad \text{(Ecuación 1)}$$

Donde:

- = intensidad de la isla de calor urbana
- = temperatura del aire registrada en la estación urbana
- = temperatura del aire registrada en la estación rural de referencia.

El cálculo del Índice de Concentración de la Precipitación (ICP) se realizó a partir de registros diarios de precipitación obtenidos de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y de la red municipal. La serie fue homogenizada considerando únicamente valores de precipitación diaria mayores o iguales a 1 mm.

Posteriormente, la información se organizó por estación meteorológica, año y estación climática (invierno, primavera, verano y otoño). Para cada agrupación se calculó el índice a partir de la proporción de la precipitación diaria respecto al total acumulado, con el objetivo de evaluar la concentración temporal de la lluvia. Este procedimiento es conceptualmente consistente con el enfoque propuesto por Martín-Vide (2004).

$$ICP = \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{P_i}{\sum_{i=1}^{n} P_i} \right)^2 \quad \text{(Ecuación 2).}$$

Donde:

- Pi = precipitación diaria en el día
- n = número de días con precipitación ≥ 1 mm

El control de calidad de datos se aplicó previo al cálculo de los índices. Se aplicó el sistema de control de calidad de la organización meteorológica mundial para evaluar límites, inconsistencia espacial y temporal, así como la detección de faltantes Se analizaron las series para la exclusión de inconsistencias físicas, tales como registros negativos de precipitación y errores de medición asociados al valor numérico 999.Por lo que, ante estos valores anómalos se efectuó una reclasificación para utilizarlos como no nulos. Esta depuración aseguró que el cálculo de ambos índices.

2.1. Isla de calor (ICU)

Las estaciones consideradas urbanas se localizan dentro del tejido construido de Xalapa y presentan atributos característicos de un entorno urbano consolidado, tales como alta densidad habitacional, baja cobertura vegetal y presencia de materiales con elevada capacidad térmica. Por su parte, las estaciones periurbanas permitieron identificar gradientes térmicos intermedios entre el centro urbano y el entorno rural.
La intensidad de la ICU se estimó diariamente para cada estación urbana respecto de la estación rural de referencia Briones, utilizando la ecuación clásica propuesta por Oke (1982). Debido a que la ICU tiende a intensificarse durante la noche como consecuencia de la liberación lenta del calor almacenado en las superficies urbanas (Arnfield, 2003), también se calculó la intensidad nocturna.
El análisis incluyó temperaturas mínimas, medias y máximas, con el propósito de identificar contrastes térmicos durante distintos momentos del ciclo diurno, en concordancia con estudios que señalan que la ICU nocturna es particularmente relevante para evaluar impactos sobre el confort térmico y la salud humana (Grimmond, 2007).

2.2. Índice de concentración de la precipitación (ICP)

El análisis del Índice de Concentración de la Precipitación (ICP) permitió evaluar la forma en que la lluvia se distribuye dentro de cada estación del año en la ciudad de Xalapa. Para este estudio se utilizaron registros disponibles desde 1951, lo que permitió analizar el comportamiento de la precipitación en un contexto de variabilidad climática de largo plazo. A partir de esta serie histórica se identificó un patrón estacional claramente definido en la distribución de la lluvia a lo largo del año.

RESULTADOS

El estudio integró la totalidad de las estaciones de la red de monitoreo distribuidas en zonas urbanas, periurbanas y rurales de Xalapa. La estación Briones (30452) fue seleccionada como sitio de referencia debido a su predominante cobertura vegetal, baja densidad constructiva y mínima influencia antropogénica. Mientras que, las estaciones urbanas se localizan en sectores con alta densidad habitacional y presencia de materiales con elevada capacidad térmica, factores analizados bajo el gradiente altitudinal correspondiente.

Los resultados confirman la existencia de una ICU, que se evidencia con dos patrones térmicos diferenciados, entorno urbano y el rural. La estación 30452 registró sistemáticamente las temperaturas más bajas, reflejando condiciones climáticas poco alteradas por la urbanización. En contraste, las estaciones inmersas en la mancha urbana registraron temperaturas mínimas y medias más elevadas, lo que evidencia una mayor retención de calor durante la noche.

La manifestación más intensa del fenómeno se observó en la estación XALAPA (CFE) (30135), donde las temperaturas nocturnas superaron, del orden de 2.53 °C, el promedio registrado en la estación rural. Este comportamiento sugiere que el espacio urbano se consolida por superficies de alta absorción térmica. De manera similar, la estación JALAPA DE ENRÍQUEZ (OBS) (30075) presentó una diferencia superior a 2.42 °C respecto a 30452. Ambos casos demuestran la existencia y el patrón de distribución de la ICU nocturna en la región.

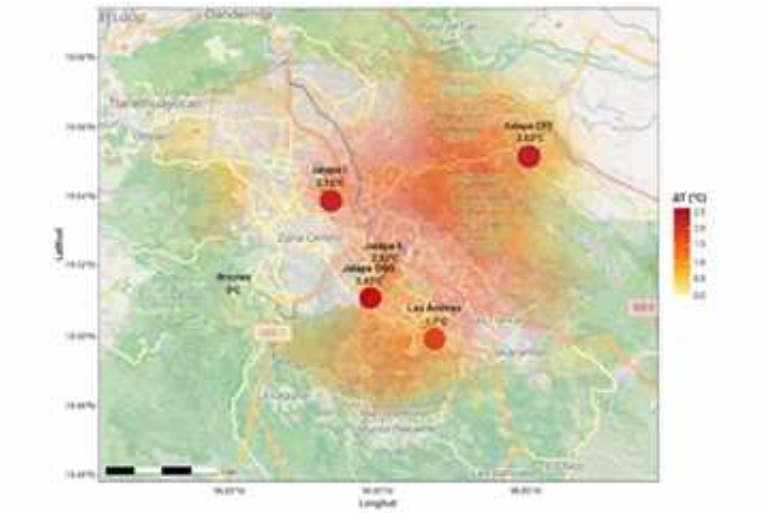


Figura 1. Isla de calor nocturna en Xalapa. Fuente: Elaboración propia

Por su parte, la estación JALAPA DE ENRÍQUEZ II (30488) registró un efecto térmico notable diurno y nocturno. En esta zona, se encuentra gran densidad de infraestructura y de flujo vehicular que, elevan las temperaturas máximas por encima de los valores rurales durante gran parte del día. Finalmente, estaciones periurbanas como Las Ánimas (30087) mostraron una condición de transición, con un calentamiento nocturno de 1.7 °C respecto al entorno rural. Esta situación documenta el impacto térmico derivado de la expansión urbana sobre antiguas áreas naturales. En cuanto al ICP, los resultados confirman una climatología caracterizada por una temporada de lluvias concentrada en verano. Donde, se acumulan volúmenes de precipitación frecuentemente superiores a 600 mm, acompañados de valores bajos del ICP, generalmente entre 0.04 y 0.07. Esto permite observar que, aunque la

precipitación es abundante, se distribuye de manera relativamente uniforme a lo largo de los días, característica típica del régimen pluviométrico asociado a la influencia orográfica en la región de Xalapa.

En contraste, invierno y primavera presentan un comportamiento opuesto: baja precipitación total, pero altamente concentrada, con valores elevados del ICP. Esto indica que la lluvia ocurre en pocos días y con alta intensidad. Dicho patrón pluviométrico contribuye a exacerbar la vulnerabilidad urbana, ya que, aunque llueve poco, los eventos pueden producir escorrentías rápidas e inundaciones. El otoño actúa como una estación de transición, con valores intermedios del ICP, aunque en algunos años presenta concentraciones elevadas posiblemente asociadas con ciclones tropicales tardíos. Un aspecto a señalar es que se encontraron múltiples casos en los que el ICP alcanza el valor máximo de 1.0, lo que indica que toda la precipitación estacional ocurrió en un solo día, aquí algunos ejemplos de ello corresponden al otoño de 1968, el invierno de 1981 y el invierno de 2003 en la estación 30075, tomados de datos del SMN. Aunque estos valores podrían considerarse anómalos, reflejan eventos meteorológicos extremos bien documentados en la climatología local, tales como, tormentas intensas o ciclones que inciden en la precipitación estacional en intervalos temporales muy reducidos.

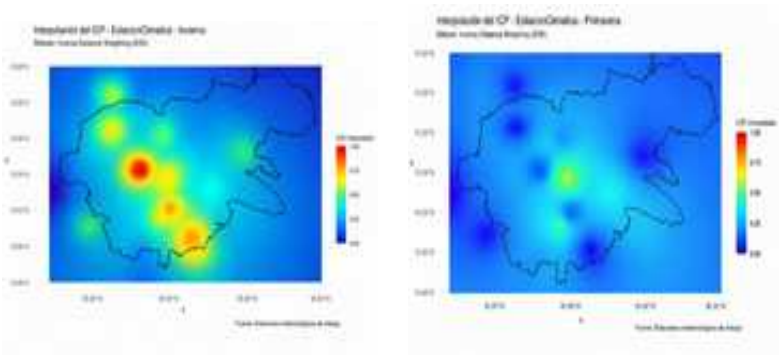


Figura 2. Mapas del ICP en invierno y primavera. Fuente: Elaboración propia

Desde una perspectiva hidrometeorológica, estos episodios representan escenarios de alto riesgo para la población, ya que combinan una baja frecuencia de días lluviosos con precipitaciones de intensidad excepcional capaces de generar inundaciones súbitas, deslizamientos y daños a la infraestructura.

CONCLUSIONES

Existe una percepción amplia entre los habitantes de la ciudad relativa al cambio del clima local. Aunque, se han realizado estudios diversos sobre esta problemática, los resultados reportados han sido heterogéneos. Por ello, resultó necesario contar con

una aproximación metodológica basada en datos locales que permitiera plantear la hipótesis sobre la modificación del clima urbano, en una ciudad que ha experimentado transformaciones urbanas aceleradas.

En el caso de la temperatura, y siguiendo la aproximación de la ICU, los resultados muestran incrementos térmicos superiores a las tendencias globales reportadas en la literatura científica. Dependiendo de la zona analizada, dichos incrementos pueden alcanzar valores cercanos a 3 °C.

En cuanto al ICP, fue posible identificar que durante invierno y primavera las inundaciones pueden asociarse con una elevada concentración de la precipitación, registrándose episodios en los que más del 25 % de la precipitación estacional ocurre en cuestión de horas.

A partir de los resultados se propone una investigación interdisciplinaria orientada a identificar medidas locales de adaptación en zonas inundables, así como evaluar espacios potenciales de arborización urbana, con el objetivo de fortalecer la política ambiental y reducir los impactos sobre la salud de la población.

AGRADECIMIENTOS

Es necesario agradecer a la Dirección de Protección Civil Municipal, en especial al LCA Didier Martínez Sánchez por el acceso a los datos de la red, así como a la delegación de CONAGUA Golfo Centro por el acceso a los datos del SMN.

REFERENCIAS

Arnfield, A. J. (2003). Two decades of urban climate research: A review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. International Journal of Climatology, 23(1), 1–26. https://doi.org/10.1002/joc.859

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2025). Base de datos climatológica nacional. Servicio Meteorológico Nacional, México.

Estrada, F., Zavala, J., Martínez, A., Raga, G., & Gay, C. (Eds.). (2023). Estado y perspectivas del cambio climático en México: Un punto de partida. Programa de Investigación en Cambio Climático, UNAM.

Grimmond, S. (2007). Urbanization and global environmental change: Local effects of urban areas. Geographical Journal, 173(1), 83–88. https://doi.org/10.1111/j.1475-4959.2007.232_3.x

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2020). Metrópolis de México, 2020. https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825007073.pdf

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2025). México en cifras: Xalapa, Veracruz de Ignacio de la Llave (30087). https://www.inegi.org.mx/app/areasgeograficas/?ag=30087#collapse-Resumen

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). Resumen para responsables de políticas. En V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, & B. Zhou (Eds.), Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.

Martín-Vide, J. (2004). Spatial distribution of a daily precipitation concentration index in peninsular Spain. International Journal of Climatology, 24(8), 959–971. https://doi.org/10.1002/joc.1030

Méndez-Romero, E. (2017). Alteraciones térmicas derivadas de la urbanización en la ciudad de Xalapa, Veracruz: Análisis espacial y temporal 1982–2015. El Colegio de Veracruz.

Oke, T. R. (1982). The energetic basis of the urban heat island. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 108(455), 1–24. https://doi.org/10.1002/qj.49710845502

Rzedowski, J. (1978). Vegetación de México. Limusa.

EL CIERRE DE CENTRALES TÉRMICAS DE CARBÓN: IMPACTO SOBRE LA CALIDAD DEL AIRE EN LA MONTAÑA CANTÁBRICA

Domingo Fernando RASILLA ÁLVAREZ[1], Francisco CONDE ORIA[1] y Miguel TORIBIO PÉREZ[1]

[1]*Departamento de Geografía, Urbanismo y OT. Universidad de Cantabria*

domingo.rasilla@unican.es, francisco.conde@alumnos.unican.es

RESUMEN

El cierre de las centrales térmicas de carbón en localidades de la Montaña Cantábrica ofrece una oportunidad para evaluar el impacto, a escala local, de la transición energética sobre la calidad del aire. Los resultados del análisis de la estación de La Robla sugieren que ese desmantelamiento contribuyó a una mejora de los niveles de NO2 y SO2, sin efectos apreciables en PM10 y O_3, en consonancia con la dinámica de la calidad del aire en localidades de topografía compleja.

Palabras clave: Transición energética, calidad del aire, Montaña Cantábrica.

ABSTRACT

The closure of two coal-fired power plants in towns in the Cantabrian Mountains provides an opportunity to assess the local-scale impact of the clean energy transition. Overall, the results of the analysis suggest that this decommissioning contributed to an improvement in NO2 and SO_2, without appreciable side effects on PM10 and O_3, consistent with air quality dynamics in areas of complex topography.

Key words: Clean energy transition, air quality, Cantabrian Mountains.

INTRODUCCIÓN

El proceso de descarbonización en la producción eléctrica española se inició en la década de 2010, con el objetivo de cerrar todas las instalaciones termoeléctricas alimentadas con carbón. Las causas de este cierre fueron diversas. Por un lado, eliminando el carbón, el combustible fósil más contaminante, ayudaría a frenar el efecto invernadero y el calentamiento global del planeta. Desde el punto de vista económico los motivos aducidos fueron su pérdida de competitividad debido al descenso de precio del gas natural y el aumento del coste de los derechos de emisiones de CO2.

Las centrales térmicas de carbón emiten grandes cantidades de contaminantes atmosféricos, responsables de algunas de las mayores catástrofes medioambientales del s. XX (río Mosa, 1930; Donora, 1948; Londres, 1952). Su cierre reduce significativamente las concentraciones de partículas finas alrededor de las zonas afectadas (Brown y Tousey, 2020; Morosele and Lagerman, 2020; Li and Jin, 2023), circunstancia especialmente relevante en áreas donde la topografía favorece episodios de estancamiento que acumulan contaminantes cerca del suelo, por ejemplo, durante inversiones térmicas.

El objetivo de este trabajo es evaluar el efecto que ha tenido el cierre de la central de La Robla en la calidad del aire a escala local, ubicada en una de las áreas con mayor densidad de centrales termoeléctricas alimentadas por carbón (Figura 1).



Figura 1. Localización de las centrales térmicas (Fuente: Wikipedia). Dcha: Vista aérea de La Robla con la ubicación de la estación de calidad del aire, de la antigua central térmica y de la cementera Tudela-Veguín. Fuente: Google Earth.

FUENTES DE INFORMACIÓN Y METODOLOGÍA

Para la realización de este trabajo se han utilizado las series horarias de SO_2, NO_2, PM_{10} y O_3 registradas en la estación de calidad del aire de La Robla (ES1297A), perteneciente a la red de vigilancia de Calidad del Aire de Castilla y León. Es una estación de tipo industrial/suburbana, cuya serie comienza en 2001, aunque sólo se dispone de datos meteorológicos desde 2015. Para evaluar el impacto del cierre de la central se compararon dos periodos:

- Periodo pre-cierre: 2015–2019
- Periodo post-cierre: 2021–2025

Se excluyó el año 2020 por su carácter anómalo debido a las restricciones de movilidad asociadas a la pandemia.

RESULTADOS

3.1. Evolución de la calidad del aire en La Robla

Como muestra la figura 2, la tendencia general de la calidad del aire en La Robla correspondió a una mejora progresiva, en la línea del resto de España, consolidándose una reducción significativa de los niveles de la mayoría de los contaminantes tras la crisis de 2008.

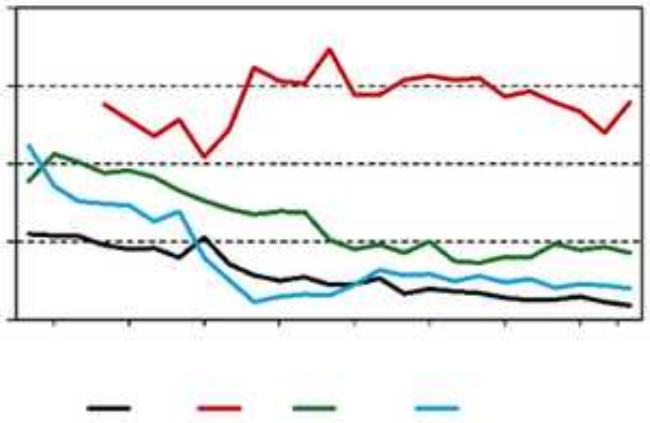


Figura 2. Evolución de los contaminantes en la estación de La Robla.Fuente: Red de Vigilancia de la Calidad del Aire de Castilla y Léon.

Sin embargo, el análisis por contaminantes revela comportamientos diferenciados:

- NO_2: descenso significativo (de 7,75 a 4,82 µg/m³)
- SO_2: reducción apreciable (de 11,3 a 8,87 µg/m³)
- PM_{10}: estabilidad (ligero aumento no significativo)
- O_3: leve descenso en valores medios, sin cambios estructurales

Estos resultados indican que el cierre de la central térmica ha tenido un impacto claro en los contaminantes directamente asociados a la combustión.

Contaminante	Promedio		Percentil 95	
	2015-2019	2021-2025	2015-2019	2021-2025
NO2 **	7.75	4,82	24	15
O3	61.0	54,3	105	94
PM10	17.1	17,8	41	43
SO2 **	11.3	8,87	40	35

*Tabla 1: Valor medio y percentil 95 de la concentraciónde contaminantes en La Robla. ** Diferencias significativas al nivel del 95 % según una prueba de Kruskall-Wallis. Fuente: elaboración propia a partir de información proporcionada por la Red de Vigilancia de la Calidad del Air de Castilla y Léon.*

Esta reducción general fue más evidente durante la estación invernal, momento en el que son frecuentes en la zona episodios de estancamiento atmosférico que inhiben la renovación del aire, cargado de contaminantes, en el fondo de los valles (Figura 3).

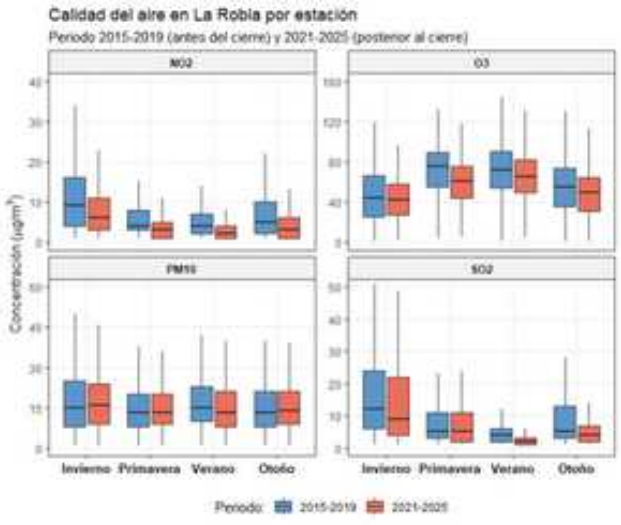


Figura 3. Variabilidad estacional de los niveles de contaminación antes y después del cierre de la central térmica de La Robla. Fuente: Red de Vigilancia de la Calidad del Aire de Castilla y Léon.

3.2. Variabilidad espacial y fuentes de emisión

La rosa de contaminación correspondiente al NO2 (Figura 4) muestra la disminución de las aportaciones procedentes de la central térmica (dirección SW) se redujeron tras el cierre de la central., no tan importantes como las procedentes de la cementera Tudela-Veguín. Esta última mantiene las aportaciones (dirección SE) prácticamente constantes durante ambos periodos

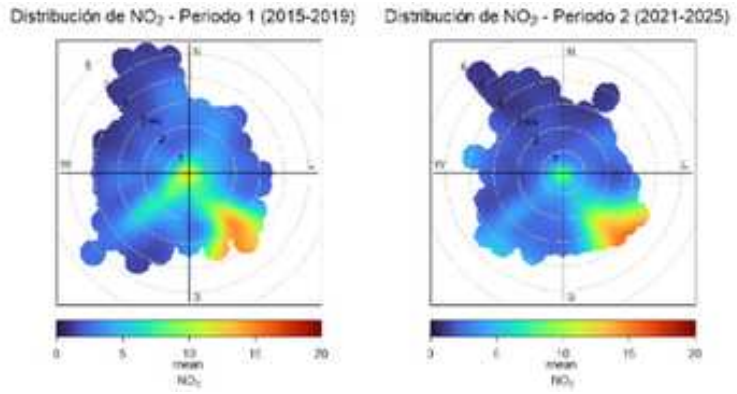


Figura 4. Rosa de contaminación correspondiente al NO2 medido en la estación de La Robla. Fuente: Red de Vigilancia de la Calidad del Aire de Castilla y Léon.

Por el contrario, la reducción de material particulado fue mínima (figura 5); de hecho, se aprecia un aumento de la concentración en las dos direcciones antes mencionadas, y una reducción en la concentración ligada a vientos del N. Sin descartar posibles cambios en la dinámica atmosférica regional que pudieran sostener cambios ligados a una mayor fuerza del viento, cabe señalar que el propio proceso de desmantelamiento de la central puede haber aportado material particulado.

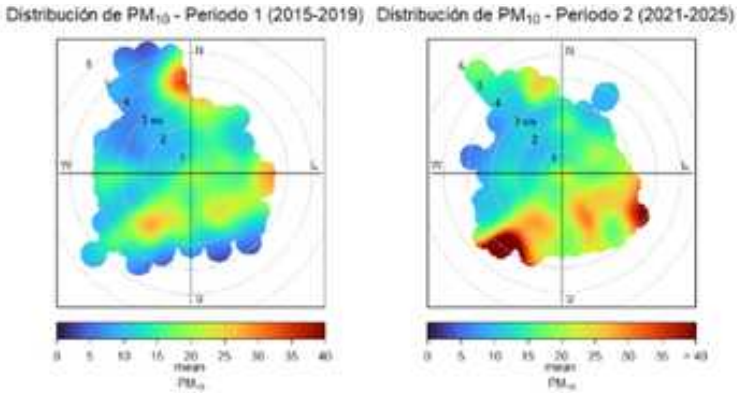


Figura 5. Rosa de contaminación correspondiente a PM10. en la estación de La Robla. Fuente: Red de Vigilancia de la Calidad del Air de Castilla y Léon.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El análisis realizado permite extraer las siguientes conclusiones:

- La calidad del aire en La Robla ha mejorado significativamente desde comienzos de siglo, en línea con la tendencia nacional.
- El cierre de la central térmica contribuyó a la ligera reducción de NO_2 y SO_2, aunque sin provocar una ruptura brusca en la tendencia anterior.
- No se observan mejoras significativas en PM_{10} ni en O_3.

En conjunto, transición energética ha sido eficaz en la reducción de contaminantes primarios, pero más como factor de consolidación que de ruptura. La ausencia de mejoras en PM_{10} y O_3 revela la importancia de procesos no locales (transporte regional de contaminantes, formación fotoquímica de ozono), resultado de la transición desde un modelo de contaminación dominado por fuentes puntuales industriales hacia otro más difuso y complejo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la cesión de los datos a la Consejería de Medio Ambiente, Vivienda y Ordenación del Territorio, de la Junta de Castilla y León

REFERENCIAS

Brown, J. P., & Tousey, C. (2020, 26–28 de julio). Death of coal and breath of life: The effect of power plant closure on local air quality [Presentación de documento]. 2020 Annual Meeting, Kansas City, MO, United States. Agricultural and Applied Economics Association. https://ageconsearch.umn.edu/record/304182.

Li, Z., & Jin, B. (2023). A breath of fresh air: Coal power plant closures and health in China. Energy Economics, 129, Artículo 107235. https://doi.org/10.1016/j.eneco.2023.107235.

Morosele, I., & Langerman, K. (2020). The impacts of commissioning coal-fired power stations on air quality in South Africa: Insights from ambient monitoring stations. Clean Air Journal, 30(2). https://doi.org/10.17159/caj/2020/30/2.8833

INTENSIDAD Y VARIABILIDAD ESPACIAL DE LA ISLA DE CALOR URBANA DURANTE LA SEGUNDA OLA DE CALOR DEL VERANO DE 2025 EN UN ENTORNO URBANO VULNERABLE

Lida MERCADO-MARTÍN[1], Miguel Ángel PADILLA-MARCOS[1]

[1]*Universidad de Valladolid, Escuela Técnica Superior de Arquitectura*

lida.mercado@uva.es, miguelangel.padilla@uva.es

RESUMEN

El aumento de la intensidad y frecuencia de las olas de calor constituye uno de los principales retos climáticos actuales, especialmente en áreas urbanas, donde la Isla de Calor Urbana (UHI) incrementa la exposición térmica y agrava los riesgos asociados al calor. El verano de 2025 estuvo marcado por varios episodios de calor extremo en la Península Ibérica, destacando la segunda ola de calor por su duración e intensidad, registrada en Valladolid entre el 6 y el 17 de agosto de 2025. Esta investigación parte de la hipótesis de que la duración del episodio influye en el comportamiento térmico urbano, condicionando la acumulación y disipación del calor, especialmente durante la noche. El objetivo es analizar la intensidad y la evolución temporal de la UHI durante este episodio, así como su relación con la exposición en un entorno urbano socialmente vulnerable. La metodología se basa en una campaña experimental realizada en verano de 2025 mediante mediciones móviles a lo largo de transectos, lo que permite caracterizar la variabilidad espacial del fenómeno. El análisis diferencia periodos diurnos y nocturnos y compara áreas urbanas con zonas de referencia menos urbanizadas. Los resultados identifican patrones de intensidad de Isla de Calor Urbana y diferencias espaciales asociadas a la configuración urbana, contribuyendo a una mejor comprensión de la exposición en eventos extremos prolongados.

Palabras clave: isla de calor urbana, ola de calor, exposición térmica

INTRODUCCIÓN

El incremento de la intensidad, frecuencia y duración de las olas de calor constituye uno de los principales desafíos asociados al cambio climático, especialmente en entornos urbanos, donde la morfología, los materiales y la vegetación modifican los balances energéticos locales y favorecen la aparición de microclimas urbanos (Brown, 2020; Oke et al., 2017). Entre ellos, la Isla de Calor Urbana (Urban Heat Island, UHI) se caracteriza por temperaturas más elevadas en áreas urbanas respecto a su entorno, debido a la acumulación de calor durante el día y su liberación gradual

durante la noche (Stewart & Mills, 2021). Durante las olas de calor, este proceso puede intensificarse, reduciendo la capacidad de enfriamiento nocturno y prolongando la exposición térmica, especialmente durante el periodo nocturno (Guo et al., 2024; Zhao et al., 2018). Este impacto se distribuye de manera heterogénea en la ciudad, condicionado por factores sociales, económicos y residenciales que determinan la vulnerabilidad de la población (Wolf & McGregor, 2013). En el contexto español, la UHI ha sido estudiada en ciudades como Madrid, Barcelona, Granada o Sevilla, constituyendo antecedentes relevantes para el análisis del fenómeno en otros entornos urbanos (Fernández-García et al., 2004; Montávez-Gómez et al., 1998; Moreno-García, 1994; Romero Rodríguez et al., 2020). Este trabajo parte de la hipótesis de que la duración de las olas de calor influye en el comportamiento térmico urbano y en la exposición térmica, especialmente durante la noche. El objetivo es analizar la intensidad y la evolución temporal de la Isla de Calor Urbana durante la segunda ola de calor del verano de 2025 en un entorno urbano socialmente vulnerable.

METODOLOGÍA

Este estudio se basa en mediciones móviles mediante transectos y su análisis en un entorno SIG para caracterizar la variabilidad térmica intraurbana durante episodios de calor extremo.

2.1. Área de estudio

El área de estudio se localiza en el barrio de La Rondilla, en Valladolid (España), en un entorno urbano consolidado con una clara diferenciación interna (Figura 1). Por un lado, presenta una zona de alta densidad edificatoria, con viviendas construidas entre 1940 y 1980, una población envejecida y bajos niveles de renta. Por otro lado, limita con espacios abiertos vinculados a los ríos Pisuerga y Esgueva, de menor densidad edificatoria.

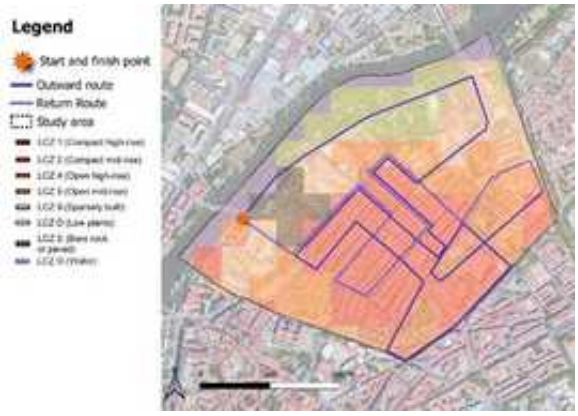


Figura 1. Recorrido del transecto móvil en el área de estudio (La Rondilla, Valladolid) y clasificación LCZ.

El área se ha clasificado mediante el sistema de Local Climate Zones (LCZ) (Stewart & Oke, 2012), identificándose principalmente tipologías correspondientes a zonas urbanas compactas de media altura (LCZ 2) en el tejido edificado, así como clases asociadas a espacios abiertos y con vegetación en las áreas próximas a los ríos.

2.2. Adquisición de datos y procesamiento

Las mediciones se realizaron mediante transectos móviles en bicicleta, utilizando un sistema portátil integrado en una cesta adaptada a bicicletas del servicio municipal, que permitió registrar de forma continua la temperatura del aire y la geolocalización.
Los recorridos se diseñaron para atravesar las distintas tipologías urbanas mediante un trazado circular con puntos de cruce, incluido el inicio y final, lo que permitió limitar y corregir la variación térmica temporal durante la medición. Los transectos se realizaron a las 08:00 y 20:00 UTC, momentos clave para analizar la relación entre las condiciones exteriores y la ventilación natural de las viviendas en verano. La campaña se desarrolló durante el verano de 2025, con una duración media de los transectos de aproximadamente 40 minutos. Para este análisis se seleccionaron los días de la segunda ola de calor en Valladolid, entre el 6 y el 17 de agosto de 2025. Como referencia térmica externa se empleó una estación de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), situada en un barrio periférico y en un entorno de parque urbano, al considerarse el punto oficial disponible que mejor se aproxima a un entorno rural para contextualizar las diferencias térmicas observadas.

2.3. Procesamiento de datos

Los datos registrados fueron normalizados, sincronizados mediante fecha y hora en UTC e integrados en QGIS. Las mediciones de temperatura se asociaron a su geolocalización y a una ruta base formada por puntos equidistantes mediante áreas de influencia y uniones espaciales, lo que permitió comparar los distintos transectos sobre una misma estructura espacial. Para reducir el efecto de la variación temporal durante el recorrido, se aplicó una corrección térmica basada en los puntos de cruce. A partir de la diferencia de temperatura entre pasadas por un mismo punto y del intervalo temporal transcurrido, se estimó una tasa de variación térmica, considerando que esta podía variar según las características físicas de cada zona. Los registros se corrigieron hacia una hora común de referencia en cada transecto. Una vez corregidos los datos, se calcularon estadísticas descriptivas de la temperatura en cada punto base. La intensidad de la isla de calor urbana se calculó como:

$$UHII_i = T_{i,corr} - T_{ref}$$

donde $UHII_i$ es la intensidad de la isla de calor urbana en el punto i, $T_{i,corr}$ la temperatura corregida del aire en dicho punto, y T_{ref} la temperatura de la estación de referencia. Finalmente, los resultados se emplearon para comparar horarios de medición y analizar las diferencias entre las tipologías LCZ .

RESULTADOS

En este apartado se analizan los resultados obtenidos durante la segunda ola de calor del verano de 2025, atendiendo a la evolución temporal, las diferencias entre horarios de medición y su variabilidad según las tipologías LCZ.

3.1. Evolución térmica temporal de la ola de calor

La evolución temporal de la temperatura del aire durante la ola de calor de agosto de 2025, a partir de los datos de la estación de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) de Parquesol, muestra que el episodio se desarrolla en Valladolid entre el 6 y el 17 de agosto (Figura 2). El final del evento se caracteriza por un descenso acusado de las temperaturas máximas, que pasan de valores superiores a 39 °C el 17 de agosto a aproximadamente 31 °C el 18. En torno al 13 de agosto se observa un ligero descenso térmico, diferenciándose dos fases dentro del episodio. Las temperaturas máximas se mantienen relativamente estables, con valores ligeramente superiores en la segunda fase, mientras que las mínimas presentan una tendencia ascendente. Desde el 9 de agosto, cuarto día del episodio, la mayoría de las noches superan los 20 °C.

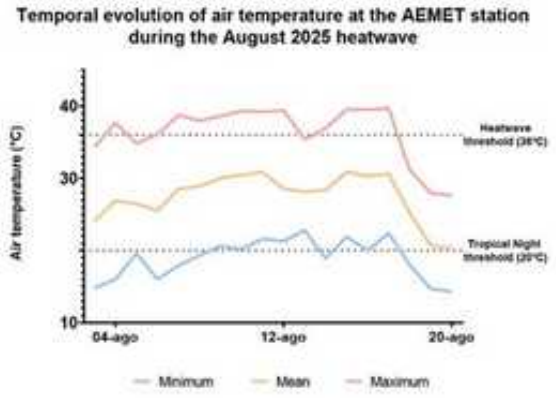


Figura 2. Evolución temporal de la temperatura del aire en la estación de la AEMET durante la segunda ola de calor (agosto 2025). Fuente: elaboración propia a partir de datos de la Agencia Estatal de Meteorología. (2025).

3.2. Variabilidad diurno–nocturna y por tipología urbana (LCZ) de la intensidad isla de calor urbana

El análisis de la intensidad de la isla de calor urbana (UHII) muestra diferencias entre los recorridos realizados a las 08:00 y a las 20:00 UTC, así como entre las distintas tipologías urbanas LCZ (Figura 3).

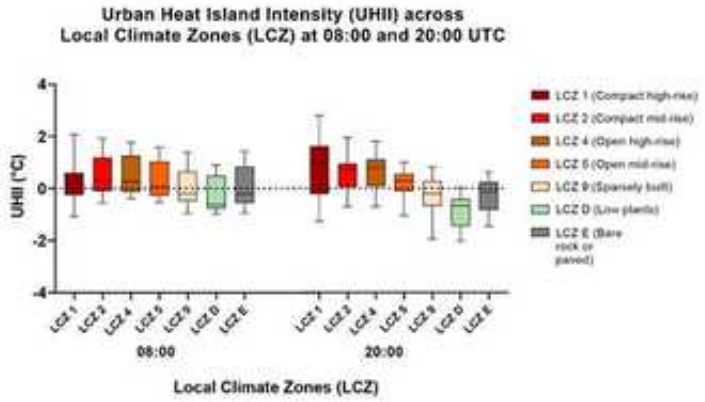


Figura 3. Intensidad de la isla de calor urbana (UHII) según la tipología urbana (LCZ) a las 08:00 y 20:00 UTC.

Considerando el conjunto de las LCZ, el rango de valores de UHII es mayor en los recorridos a las 20:00 UTC, lo que refleja un contraste térmico más acusado entre las tipologías urbanas. Por la mañana, las diferencias entre LCZ son menores, aunque siguen un patrón similar. En términos generales, las zonas más compactas (LCZ 1 y LCZ 2) presentan valores de UHII más altos. A medida que disminuye la compacidad, la intensidad de la UHI también disminuye. Las LCZ abiertas (LCZ 5, LCZ 6 y LCZ 9) muestran valores intermedios, mientras que las áreas con mayor presencia de vegetación (LCZ D y LCZ E) presentan valores más bajos, que son mayoritariamente negativos en LCZ D (Low plants). Aunque el rango total dentro de cada LCZ es similar entre ambos horarios, el rango intercuartílico es más amplio a las 08:00 UTC, lo que indica una mayor dispersión interna por la mañana frente a una mayor diferenciación entre tipologías a las 20:00 UTC.

DISCUSIÓN

Los resultados muestran una mayor intensidad de la isla de calor urbana durante el periodo nocturno, asociada a la acumulación de calor en el tejido urbano y a la reducción del enfriamiento nocturno durante la ola de calor, reflejada en el aumento progresivo de las temperaturas mínimas. En términos espaciales, las diferencias entre tipologías LCZ evidencian la influencia de la morfología urbana en la intensidad de la UHI, con valores más elevados en áreas compactas y menores en zonas abiertas y con vegetación. No obstante, estas últimas coinciden con el entorno de los ríos Pisuerga y Esgueva, por lo que los menores valores observados también pueden estar influidos por su efecto microclimático. Asimismo, la variabilidad interna dentro de cada tipología evidencia la influencia de factores locales. La metodología presenta algunas limitaciones, ya que los horarios de medición responden al periodo habitual de ventilación natural de las viviendas y no coinciden necesariamente con el momento de máxima intensidad de la UHI. Además, la estación de referencia, aunque es el

punto oficial disponible que mejor se aproxima a un entorno rural, presenta limitaciones como referencia externa. Por ello, el análisis podría complementarse con una referencia local basada en las zonas LCZ más abiertas y con vegetación.

CONCLUSIONES

Los resultados muestran una mayor intensidad de la isla de calor urbana durante el periodo nocturno y un gradiente térmico asociado a la configuración urbana, con valores más altos en áreas compactas y menores en zonas abiertas y con vegetación. La interpretación de estos resultados debe considerar las limitaciones metodológicas del estudio, especialmente la selección de horarios vinculados al periodo de ventilación residencial y el uso de una estación de referencia rural con limitaciones.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado en el marco de la financiación con cargo a la convocatoria de contratos predoctorales Uva (2022), cofinanciado por el Banco Santander.

REFERENCIAS

Brown, S. J. (2020). Future changes in heatwave severity, duration and frequency due to climate change for the most populous cities. *Weather and Climate Extremes*, *30*, 100278. https://doi.org/10.1016/J.WACE.2020.100278

Fernández García, F., Montávez Gómez, J. P., González Rouco, J. F., & Valero Rodríguez, F. (2004). *Arcimis: Relación entre la estructura espacial de la isla térmica y la morfología urbana de Madrid*. https://repositorio.aemet.es/handle/20.500.11765/9070

Guo, Y. T., Chan, K. H., Qiu, H., Wong, E. L. yi, & Ho, K. F. (2024). The risk of hospitalization associated with hot nights and excess nighttime heat in a subtropical metropolis: a time-series study in Hong Kong, 2000–2019. *The Lancet Regional Health - Western Pacific*, *51*, 101168. https://doi.org/10.1016/j.lanwpc.2024.101168

Klinsky, S., & Mavrogianni, A. (2020). Climate justice and the built environment. *Buildings and Cities*, *1*(1), 412–428. https://doi.org/10.5334/BC.65

Montávez Gómez, J. P., Sánchez, E., Jiménez Jiménez, J. I., Montávez Gómez, J. P., Sánchez, E., & Jiménez Jiménez, J. I. (1998). Un estudio de la intensidad y forma de la isla de calor de Granada. *Clima y Ambiente Urbano En Ciudades Ibéricas e Iberoamericanas*, 315–326.

Moreno-garcia, M. C. (1994). Intensity and form of the urban heat island in barcelona. *International Journal of Climatology*, *14*(6), 705–710. https://doi.org/10.1002/JOC.3370140609

Oke, T. R., Mills, G., Christen, A., & Voogt, J. A. (2017). Urban climates. *Urban Climates*, 1–525. https://doi.org/10.1017/9781139016476

Romero Rodríguez, L., Sánchez Ramos, J., Sánchez de la Flor, F. J., & Álvarez Domínguez, S. (2020). Analyzing the urban heat Island: Comprehensive methodology for data gathering and optimal design of mobile transects. *Sustainable Cities and Society*, *55*. https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102027

Stewart, I. D., & Mills, G. (2021). The Urban Heat Island: A Guidebook. In *The Urban Heat Island*. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815017-7.09997-5

Stewart, I. D., & Oke, T. R. (2012). Local climate zones for urban temperature studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *93*(12). https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1

Wolf, T., & McGregor, G. (2013). The development of a heat wave vulnerability index for London, United Kingdom. *Weather and Climate Extremes*, *1*, 59–68. https://doi.org/10.1016/J.WACE.2013.07.004

Zhao, L., Oppenheimer, M., Zhu, Q., Baldwin, J. W., Ebi, K. L., Bou-Zeid, E., Guan, K., & Liu, X. (2018). Interactions between urban heat islands and heat waves. *Environmental Research Letters*, *13*(3), 034003. https://doi.org/10.1088/1748-9326/AA9F73

LABORATORIO DE CALIDAD DEL AIRE DE CANARIAS: A SCIENTIFIC INFRASTRUCTURE LINKING TO THE ATMOSPHERE, PUBLIC HEALTH, ECOSYSTEMS AND CLIMATE

Diana MESA-MORILLO[1], Jessica LÓPEZ-DARIAS[1], Nataly LÓPEZ-FERNÁNDEZ[1], Gorka VILLENA-ARMAS[1], Ibtissen BELBACHIR[1], Borja PÉREZ[1], Güize ALVAREZ[1], Eva DELGADO-DELGADO[1], Jon VILCHES[2], Fernando HERRERA[2], Sergio RODRÍGUEZ[1]

[1]Group of Atmosphere, Aerosols and Climate, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, IPNA CSIC, Tenerife, Canary Islands, Spain;
[2] Servicio de Prevención y Control de la Contaminación, Consejería de Transición Ecológica y Energía, Gobierno de Canarias

diana.mesa@csic.es, jvilsar@gobiernodecanarias.org

ABSTRACT

The objective of the Laboratorio de Calidad del Aire de Canarias (AirCanLab) (https://aircanlab.csic.es/) is to address issues of air pollution and its impact on air quality, public health, ecosystems and climate. This new scientific infrastructure allows the investigation of air quality problems, such as extreme dust events that have occurred over the last 5 years (Rodríguez and López-Darias, 2024), the 2021 volcanic eruption in La Palma that led to lockdowns 35000 persons due the volcanic air pollution (López-Darias et al., 2025), extreme wildfires (e.g. Tenerife in 2023, a sixth-generation fire), or the management of air quality within the frame of the new European air quality directive.

The AirCanLab is operative since the beginning of 2024. The infrastructure allows determining about 80 chemical species in each aerosol (PM10, PM2.5, etc..) sample, including the elemental composition by ICP-MS and XRF, ions by ion chromatography, organic carbon and elemental carbon by TOR/TOT and organic speciation with GC-MS. The AirCanLab has an ISO-EN-UNE-17025 > certification by ENAC.

A first study carried out at AirCanLab has focused on identifying the origin of PM10 particles across the Canary Islands through a one-year study of aerosol chemistry at (i) a remote marine site in La Graciosa Island, (ii) at an urban background site in Puerto del Rosario, Fuerteventura, a main path entry of the dust events in winter , and (iii) at Las Palmas de Gran Canaria and Santa Cruz de Tenerife,the two largest cities of the Canary Island. This first study has allowed quantifying the contributions to PM10 of the local Canarian emissions of air pollutants, of the transboundary air pollution, Saharan desert dust and sea salt. These results have important implications for the

application of the new European air quality directive 2424/2881 in the Canary Islands. Ongoing research includes the study of organic carcinogenic compounds linked to combustion, the identification of Canarian sources of PM pollution and their chemical speciation, the identification of the aerosol chemical reactions during transboundary air pollution, the solubility of trace metals and their implications for marine ecosystems, the development of methodologies to apply the new air quality directive and the optimization of laboratory analytical techniques to provide faster responses.

Key words: desert-dust, Air quality, climate change, PM10, Public health

INTRODUCCIÓN

The Laboratorio de Calidad del Aire de Canarias (AirCanLab) (aircanlab.csic.es) is shaped by a distinctive combination of natural, geographical and anthropogenic factors. The location of the archipelago in the north-eastern Atlantic places it in an area highly exposed to Saharan mineral dust transport events, marine aerosol influence, local emissions from urban and port areas, and exceptional episodes associated with high-intensity natural phenomena. Within this context, AirCanLab, is conceived as a scientific infrastructure designed to improve the characterisation of atmospheric pollution and to provide knowledge applicable to public health protection, environmental management and climate adaptation. The need for this type of infrastructure has been reinforced by several recent episodes. These include the occurrence of extreme desert-dust outbreaks in recent years, the 2021 volcanic eruption in La Palma, which caused severe volcanic air-pollution problems, and extreme wildfires, including the 2023 Tenerife wildfire, described as a sixth-generation fire. These cases show that air pollution in island territories cannot be addressed solely as a conventional urban problem. It requires analytical capacity, chemical interpretation, temporal monitoring, and a direct connection with public health, ecosystems and decision-making.

AirCanLab addresses this need through an integrated approach to the study of atmospheric particulate matter, particularly PM10 and PM2.5. Its added value does not lie only in measuring concentrations, but also in explaining the origin, composition and chemical transformation of aerosols. This capacity is essential for distinguishing between natural contributions, such as desert dust and sea salt, and local or transboundary pollution sources associated with combustion, traffic, port activity, wildfires and other processes. Source differentiation is crucial for interpreting data correctly, defining management measures and applying European air-quality legislation with scientific rigour.

1.1. General objective and scope of AirCanLab

The main objective of AirCanLab is to address atmospheric pollution problems and

their effects on air quality, public health, ecosystems and climate. This objective places the laboratory in a cross-cutting position: it is not limited to producing analytical data, but rather connects these data with questions related to environmental management, human exposure, territorial vulnerability and climate change. The infrastructure makes it possible to study complex pollution episodes, assess the contribution of different sources to PM10 and PM2.5, and develop methodologies that are useful for the implementation of current and future air-quality regulations.

The scope of AirCanLab for three reasons. First, the archipelago is recurrently affected by Saharan dust outbreaks, with direct impacts on visibility, respiratory exposure and air-quality indicators. Second, the islands have local emission sources concentrated in urban environments, port areas, traffic corridors, industrial activities and combustion episodes. Third, their island and oceanic setting means that marine aerosol and atmospheric chemical interactions play a significant role, both in the composition of particulate matter and in its environmental effects.

The infrastructure is conceived as a bridge between instrumental observation, advanced chemical analysis and public utility. Its results can support public administrations in the interpretation of poor air-quality episodes, in the identification of sources, in the justification of natural contributions when appropriate, and in the design of emission-reduction strategies. This applied dimension is particularly relevant in the framework of the new European Air Quality Directive, which requires more accurate exposure assessment, improved source traceability and responses more closely aligned with scientific evidence.

1.2. Institutional framework

AirCanLab is framed within the collaboration between the Spanish National Research Council (CSIC), and the Government of the Canary Islands, through the regional authority responsible for ecological transition and air-quality management. This institutional framework positions AirCanLab as an initiative based on scientific and administrative cooperation. The financial support associated with this framework should not be understood merely as instrumental funding, but as an investment in public capacity for analysis, diagnosis and response to atmospheric pollution episodes. The articulation between CSIC and the Government of the Canary Islands strengthens the transfer of knowledge from research to air-quality management and supports the development of evidence-based environmental policy.

1.3. Analytical capabilities and quality assurance

AirCanLab is operative since the beginning of 2024 and has advanced analytical capabilities for characterising the chemical composition of aerosol samples. The infrastructure allows the determination of approximately 80 chemical species in each particulate-matter sample, including PM10, PM2.5 and other relevant fractions. This

analytical breadth is essential because particulate matter is not a single substance, but a complex mixture of mineral components, salts, carbonaceous material, metals, organic compounds and secondary products formed in the atmosphere. The impacts of PM depend on PM composition.

The combination of instrumental techniques is one of the strongest elements of the infrastructure. Major (Al, Fe, Ca, Na and K) and trace elements (Ti, Sr, Mn..... a total of 46 elements) of desert dust and heavy metals (As, Cd, Ni and Pb) are determined by Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS), a reference methodology for heavy metals in the European Norms for air quality. Ions (F (-), Cl (-), NO2(-), Br (-), NO3 (-), PO4 (3-), SO4 (2-) and oxalates) and cations (Na (+), NH4 (+), K (+), Mg (2+) and Ca (2+)), linked to sea salt and secondary inorganic pollutants.

The content in elemental carbon (EC) linked to combustion emissions and organic carbon (OC) linked to a diversity of sources (including combustion and biogenic) is determined with Thermo-Optical Reflectance / Thermo-Optical Transmission (TOR/ TOT) technique. The speciation of the organic compounds is determined with Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS), a technique allows determining species subject to limit values within the European air quality standards due to their carcinogenic effects (Example: benzo[a]pyrene) and other species (example: Pyrene) linked to a diversity of sources (biogenic, combustion, etc…).

Quality Assurance / quality control is a key component. The AirCanLab holds an accreditation by the Entidad Nacional de Acreditación en España (ENAC) for the ISO/IEC 17025 < General requirements for the competence of testing and calibration laboratories> > for the determination of PM10 concentrations using the reference method EN 12341:2024. AirCanLab is now working to extend this certification to other analytical determinations.

1.4 First study- transfer of knowledge-: origin of PM10 in the Canary Islands

The AirCanLab operates as a research infrastructure whose main mission of creating new knowledge and its transfer to society, with an important component to administrations and socioeconomical sectors. In this frame, the first study has focused on identifying the origin of PM10 in the Canary Islands, with a view to air quality management by authorities applying the European Directive 2024/2881 “On ambient air quality and cleaner air for Europe”, of the European parliament and of the council, to enter into force by 2030.

This first study is based on daily PM10 observations in four sites: at (i) La Graciosa, a remote marine site which allows studying the composition of the aerosols arriving to the Canary Islands within the trade winds, (ii) at Puerto del Rosario, Fuerteventura, a main entry of the Saharan dust, and (iii) at Las Palmas de Gran Canaria and Santa

Cruz de Tenerife, the two largest cities of the Canary Islands. Results shows that PM10 in the Canary Islands have four main origins: (1) local canarian emissions, mainly due to vehicle exhausts, (2) desert dust from North Africa, (3) natural sea salt, with not known effects on human health, (4) transboundary air pollution, with high load when air arrives from North Africa. This information is vital for air quality management by the Government of the Canary Islands and by the Ministry of Ecological Transition and Demographic Challenge of Spain, to apply the new European air quality directive. These results have several implications:

1. Natural sources, as sea salt and Saharan dust, lead to PM10 concentrations exceeding limit values for PM10, so a methodology to account for these exceedances is needed,
2. Once these natural contributions are discounted, PM10 concentrations in the Canary Islands do not exceed the limit values of the new European air quality directive,
3. The only option to improve air quality is to decrease the canarian emissions of vehicle exhaust emissions, since the other source are external to the Canary Islands.

This information is essential for distinguishing between local mitigation measures and natural or regional phenomena that require a different regulatory interpretation. The study provides an empirical basis for moving from concentration measurement to source attribution. This transition is important because air-quality management requires the identification of responsibilities, margins for action and priorities for intervention. Local sources can be addressed through emission-reduction measures, urban planning, combustion control, port management and mobility policies. By contrast, Saharan dust and sea-salt contributions require forecasting tools, risk communication, public-health protocols and appropriate criteria for regulatory assessment.

1.5 Research lines and expected impact

An important task of the AirCanLab is the creation of knowledge to promote research focused on a better management of resources for improving life quality of citizens. During the first year of operation AirCanLab generated about 85000 daily data of chemicals at several of the Canary Islands. These data, and the new ongoing data set, are being used for scientific research, some of them in collaboration with other institutions.

Ongoing research at AirCanLab expands the first study into several lines of high scientific and social relevance. One important line is the assessment of concentrations and identification of the origin of carcinogenic organic compounds associated with

combustion processes. This line directly connects atmospheric chemistry with public health, since not all particles have the same toxicity or the same origin. The identification of specific compounds improves risk assessment and helps guide measures targeting combustion sources, wildfire episodes and urban emissions. Data created by AirCanLab are also been used for studying the health effects linked to the exposure of Saharan desert dust. Of particular interest is the identification of the profile of the persons susceptible to suffer health effects due to dust exposure, as is the case of Hearth Failure and other diseases already identified (Domínguez-Rodríguez et al., 2025).

Impact on marine ecosystems. First results of AirCanLab evidence that the ocean is receiving important amounts of particulates arriving from North Africa, (dust + pollutants) some of them may act as toxics, whereas other are nutrients for marine ecosystems. This is of special relevance since previous studies have shown how atmospheric inputs of dust exert a notable influence on fisheries (Rodríguez et al., 2023). In this contest, AirCanLab is developing a research line focused on the solubility of trace metals and their implications for marine ecosystems (Rodríguez et al., 2021).

The expected impact can be summarised in four main areas. In public health, AirCanLab contributes to a better understanding of exposure to particles and potentially toxic compounds (i). In environmental protection, it allows the assessment of effects on terrestrial and marine ecosystems, including the input of dust and trace metals (ii). In climate research, it provides information on aerosols, a key component of the atmospheric system because of their radiative influence and their interaction with clouds and atmospheric processes (iii). In governance, it offers accredited and scientifically interpretable data to support public policies, regulatory reports and prevention strategies (iv).

REFERENCIAS

Domínguez-Rodríguez, A., Abreu-Gonzalez, P., Rodríguez, S., Baéz-Ferrer, N., Avanzas, P., López-Darias, J., Belbachir, I., Villena-Armas, G., García, M. I., Vilches, J., Diaz, R., and Hernández-Vaquero, D.: Exposure to respirable desert dust entering indoors prompts quick oxidative-stress and inflammatory responses in the airways of chronic heart failure patients, Scientific Reports, 15, 28318, https://doi.org/10.1038/s41598-025-14289-1, 2025.

López-Darias, J., Rodríguez, S., De La Rosa, J., Vilches, J., Boulesteix, T., Taquet, N., Belbachir, I., Villena-Armas, G., Sánchez De La Campa, A. M., García, O., and Ayala, J. H.: Source apportionment of processes contributing to volcanic PM10 aerosols during the 2021 eruption of Tajogaite, Science of The Total Environment, 1000, 180321, https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.180321, 2025.

Rodríguez, S. and López-Darias, J.: Extreme Saharan dust events expand northward over the Atlantic and Europe, prompting record-breaking PM 10 and PM 2.5 episodes, Atmospheric Chemistry and Physics, 24, 12031–12053, https://doi.org/10.5194/acp-24-12031-2024, 2024.

Rodríguez, S., Prospero, J., López-Darias, J., García-Alvarez, M., Zuidema, P., Nava, S., Lucarelli, F., Gaston, C., Galindo, L., and Sosa, E.: Tracking the changes of iron solubility and air pollutants traces as African dust transits the Atlantic in the Saharan dust outbreaks, Atmospheric Environment, 246, 118092–118092, https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.118092, 2021.

Rodríguez, S., Riera, R., Fonteneau, A., Alonso-Pérez, S., and López-Darias, J.: African desert dust influences migrations and fisheries of the Atlantic skipjack-tuna, Atmospheric Environment, 312, 120022–120022, https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2023.120022, 2023.

PRINCIPALES LÍNEAS DE ACCIÓN CLIMÁTICA EN LA PLANIFICACIÓN TURÍSTICA A ESCALA LOCAL

María Belén GÓMEZ MARTÍN[1], Xosé Antón ARMESTO LÓPEZ[1], Martí CORS IGLESIAS[1], Emilio MARTÍNEZ IBARRA[2]

[1]*Universitat de Barcelona*
[2] *Universidad de Granada*

bgomez@ub.edu , armesto@ub.edu , marti.cors@ub.edu , emibarra@ugr.es

RESUMEN

Esta aportación explora las principales líneas de acción climática definidas en los planes estratégicos de turismo vigentes en una selección de destinos en España. Para ello, se realiza un análisis de contenido de estos que adopta un abordaje crítico que tiene en cuenta los objetivos y contextos de elaboración de los documentos de planificación. Los resultados indican que, si bien los planes incluyen acciones climáticas adaptadas a las particularidades del destino, se observan algunos lineamientos comunes de interés, pero también destacadas ausencias o fallos en lo relativo a la consideración de las cuestiones climáticas que pueden derivar en una falta de fundamentación en la toma de decisiones.

Palabras clave: planificación estratégica, turismo, cambio climático, resiliencia.

ABSTRACT

This contribution explores the main lines of climate action defined in the strategic tourism plans in force in a selection of destinations in Spain. To this end, a content analysis of these is carried out that adopts a critical approach that considers the objectives and contexts of preparation of the planning documents. The results indicate that, although the plans include climate actions adapted to the particularities of the destination, there are some common guidelines of interest, but also notable absences or failures in relation to the consideration of climate issues that can lead to a lack of foundation in decision-making.

Key words: strategic planning, tourism, climate change, resilience.

INTRODUCCIÓN

La crisis climática representa un factor crítico de riesgo para la sostenibilidad de los destinos turísticos. Estos se enfrentan al importante reto de acomodar esta perturbación, tratando de mejorar y renovar las estructuras y funciones del turismo con ánimo a alcanzar el ansiado logro del desarrollo.

Todos los destinos turísticos están expuestos a la posibilidad de ser afectados negativamente en este escenario de cambio. Sin embargo, aun en el caso de mostrar similares condiciones geográficas y tipos de amenazas, los destinos turísticos presentan diferentes grados de vulnerabilidad en función de las políticas implementadas y las disímiles estrategias de acción climática desarrolladas en ellos (Füssel y Klein, 2006; Mínguez y Ricart, 2024; Santos-Lacueva et al., 2017; Tanrisever et al., 2024). Estas cuestiones diferenciales son en definitiva las que determinan la competitividad, la sostenibilidad y resiliencia de los territorios turísticos, así como la distribución de los costes y beneficios entre todos los actores directa o indirectamente implicados en la actividad.

Resulta indiscutible la importancia de tener en cuenta el cambio climático y sus efectos asociados en la planificación y gestión sostenible de los destinos turísticos. A menudo se pasa por alto el potencial de la acción climática a escala local, pensando erróneamente que ésta únicamente está reservada a la escala regional, estatal o supraestatal. Así, las administraciones estatales o regionales con competencias sobre la planificación turística a menudo elaboran planes de acción climática sectoriales, que suelen estar vinculados a iniciativas de rango superior. Sin embargo, son los destinos turísticos los que juegan un papel estratégico en la concreción de esta acción climática en la escala local: en ellos se desarrollan buena parte de las actividades de producción y consumo turístico; se plasma la interconexión de los diferentes sectores, esferas y actores implicados; se manifiestan los efectos de la actividad sobre el medio ambiente, la economía y la sociedad; y se producen la mayoría de los impactos directos e indirectos derivados del fenómeno climático (Gómez, 2017; 2025). Esta confluencia de factores proporciona a los gobiernos y actores locales una posición óptima para el despliegue de una acción efectiva, si bien ésta resulta difícil por la multidimensionalidad del turismo y la complejidad derivada; la incertidumbre en torno a los riesgos asociados al cambio climático y las consecuencias de las acciones de adaptación y mitigación practicadas (o la inacción); y la divergencia en los puntos de vista, valores y objetivos estratégicos que se puedan aplicar en la planificación y gestión (a distintos niveles y esferas).

La planificación y gestión turística a escala local puede (y debe) incluir acciones directamente enfocadas a mitigar el cambio climático y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), así como promover acciones dirigidas a incentivar la conciencia climática o los comportamientos turísticos sostenibles. Del mismo modo, la planificación y gestión turística a escala local debe contemplar estrategias para ayudar en el propósito de la adaptación a las consecuencias del cambio climático. Considerar el cambio climático en la planificación turística exige de una política turística que se aleje del crecimiento, el aumento de los ingresos y la maximización de los beneficios económicos (Becken, 2019; Becken et al., 2020; Joppe, 2018). Atender al reto del

cambio climático requiere de modificaciones profundas en los objetivos que persiguen las instituciones regionales y estatales, a menudo alineados con el paradigma neoliberal dominante. Estos objetivos y políticas turísticas de rango superior entran en conflicto con los objetivos de desarrollo que, en ocasiones, persiguen los actores y los gobiernos locales, haciendo que los buenos propósitos de estos últimos no siempre sean viables.

En este contexto, los destinos turísticos pueden trabajar a favor de la acción climática a través del uso de diversos instrumentos relativos a la planificación del turismo. En España, en la escala local, se señalan fundamentalmente tres vías para ello: los planes estratégicos de turismo a nivel destino (objeto de atención en esta aportación), los Planes de Sostenibilidad Turística en Destinos y, por último, aunque en este caso no necesariamente desde un enfoque turístico, los planes de acción climática local (planes de adaptación al cambio climático, planes de acción por la energía sostenible y el clima, planes cero emisiones, etc.). Esta comunicación explora las principales líneas de acción climática definidas en los planes estratégicos vigentes en los destinos situados en una selección de regiones de interés turístico en España.

METODOLOGÍA

Para dar cumplimiento al objetivo señalado se procede a un análisis de contenido cualitativo de los planes estratégicos de turismo presentes en cuatro áreas geográficas de interés como son el Alt Pirineu i Aran (Cataluña), la Serranía de Ronda y Grazalema (Andalucía), la Ribeira Sacra (Galicia) y la Ribera del Duero soriana y burgalesa (Castilla y León). El análisis de contenido es un método utilizado con frecuencia en el estudio de documentos relativos a políticas, planificación y gestión que permite definir las dimensiones de análisis en función de los objetivos particulares de la investigación. Para proceder al análisis se ha hecho uso de una ficha-tipo que ha permitido estructurar la información de acuerdo con el propósito de estudio. De este modo, se han explorado la presencia de contenidos climáticos en las diferentes fases del proceso de planificación estratégica, abarcando desde la fase de análisis-diagnóstico hasta la fase de control y seguimiento. A diferencia de los planes reglados bajo normativa (planes territoriales y urbanísticos) que son vinculantes y de obligado cumplimiento, los planes estratégicos son, en líneas generales, un decálogo de buenas intenciones, un programa de máximos no vinculante, con una serie de ejes estratégicos y acciones concretas que tienen como propósito marcar el futuro más inmediato en términos turísticos en un determinando territorio. Estos planes son documentos recientes en cuanto a su elaboración y muy inmediatos en cuanto a su aplicación, por lo que reflejan muy bien cuáles son las sensibilidades del momento con relación a la temática que se aborda; además, cubren áreas de estudio que presentan algunas similitudes que permiten establecer una exploración en términos comparativos.

RESULTADOS

Los destinos turísticos son sistemas complejos que se encuentran en un proceso continuo de respuesta, anticipada o no, a las diferentes tensiones internas y externas que influyen en sus posibilidades de desarrollo. La planificación estratégica del turismo en el ámbito local se configura como un instrumento que pretende abordar las problemáticas que tensionan al destino, planteando soluciones proactivas que involucren a la comunidad local y a los agentes económicos y territoriales implicados en la toma de decisiones. Para que la planificación estratégica del turismo pueda plantearse desde un enfoque de sostenibilidad es fundamental entender que el desarrollo y la competitividad del destino se encuentran fuertemente asociadas a su base territorial pero condicionadas por un contexto global dinámico y desafiante, en el que el cambio climático adquiere cada vez más protagonismo. Es por ello por lo que, una planificación estratégica del turismo que aspire a lograr el desarrollo y la resiliencia climática del destino debe contribuir a reducir las emisiones de GEI y adaptarse a los impactos previstos del cambio climático. Los objetivos climáticos suelen estar cada vez más presentes en estas tipologías de documentos, significándose algunas líneas estratégicas y acciones en materia de mitigación y/o adaptación cuya consideración resulta fundamental para el logro del desarrollo económico, ambiental y social del destino. Si bien los planes incluyen acciones climáticas adaptadas a las particularidades del destino, se observan algunos lineamientos comunes de interés, pero también destacadas ausencias o fallos en lo relativo a la consideración de las cuestiones climáticas.

La teoría señala que los planes estratégicos de turismo a escala local analizan las características territoriales y turísticas del destino para elaborar un diagnóstico exhaustivo que permita la definición de un modelo turístico para el lugar y, acorde a este, el establecimiento de unos objetivos estratégicos, un plan de acción para su implementación y un sistema de control para su seguimiento. El análisis de la presencia climática en los planes estratégicos locales analizados pone en evidencia algunas cuestiones de interés:

a) *Inadecuados abordajes de las "cuestiones climáticas" en las fases de análisis y diagnóstico*. En esta fase de la planificación cabría esperar, al menos, una caracterización del clima como recurso turístico; una identificación de los principales eventos extremos que afectan al territorio turístico; y un análisis de exposición, sensibilidad y vulnerabilidad del destino al clima y al cambio climático. Del mismo modo, en esta fase cabría esperar como mínimo la identificación de las emisiones turísticas del destino y una caracterización de los puntos críticos en huella de carbono (movilidad, restauración, alojamiento). Sin embargo, el análisis de estas cuestiones no está presente en los planes de los destinos examinados que se limitan, en el mejor de los casos, a la presentación de datos medios de temperatura y precipitación y alguna

referencia al registro de episodios extremos, sin proporcionar información de detalle (con resolución espacial y temporal adecuada) que permita conectar las cuestiones climáticas con la gestión y la planificación del turismo para la adaptación o para la descarbonización. El clima y el cambio climático se encuentran presentes en el relato, pero los documentos no aportan información de calidad que fundamente el diseño de una acción efectiva.

b) Contradicciones en el diseño de las estrategias de acción. Los planes analizados plantean estrategias que tienen como meta el desarrollo de un modelo de turismo sostenible. Pero en la definición de la misión y visión de futuro, los planes señalan el crecimiento turístico como aspiración, siendo minoritarios aquellos que señalan la limitación de la capacidad de carga de los destinos como planteamiento de base para la acción climática en materia de adaptación y mitigación.

c) Ejes priorizados en los objetivos estratégicos. En el señalado contexto de contradicción, los planes estratégicos de turismo analizados incluyen medidas para la adaptación y/o la mitigación del cambio climático. Estas están destinadas al impulso de: i) la movilidad sostenible a través del fomento de la movilidad lenta (no motorizada), la intermodalidad sostenible en el transporte y los servicios de movilidad compartida; ii) el incentivo a propuestas de sistemas agroalimentarios más localizados; iii) el control sobre la generación de residuos para favorecer su reducción y/o su reciclaje; iv) la conservación y gestión de los ecosistemas naturales no solo por su valor como elementos patrimoniales y recursos turísticos, sino también por su interés como activos que favorecen los mecanismos de fijación de CO2 que ayudan a la mitigación del cambio climático y, a su vez, como activos de la naturaleza que pueden ayudar en los procesos de adaptación al cambio climático; v) la diversificación de la oferta de productos turísticos; vi) la diversificación de los segmentos de demanda turística; vii) el incentivo a la desestacionalización; y viii) la certificación ambiental de las empresas y destinos turísticos como herramienta para la gestión de la energía y el agua.

d) Ejes ausentes en los objetivos estratégicos. En los planes analizados se registran pocas medidas y acciones relacionadas con: i) la reducción del riesgo climático; ii) la mejora de la información climática para la toma de decisiones; y iii) la acción en materia de comunicación climática.

e) Escasa presencia de las cuestiones climáticas en los indicadores de seguimiento. En el conjunto de indicadores de seguimiento, los concernientes a la adaptación y mitigación del cambio climático son minoritarios. Estos se relacionan, fundamentalmente con el seguimiento de la desestacionalización y la progresión de las certificaciones ambientales.

CONCLUSIONES

Los planes estratégicos de turismo en la escala local permiten plantear acciones que puedan dar respuesta a los problemas, retos y desafíos que surgen en el destino turístico. Entre ellos, se encuentran los relativos a la adaptación y mitigación del cambio climático. Si bien los planes analizados muestran preocupación por esta cuestión y plantean diversas líneas de acción al respecto, sorprende la escasa presencia de análisis climático en profundidad en la fase de análisis-diagnóstico. Esta cuestión pone en evidencia la falta de fundamentación en la estrategia de acción que puede derivar en la adopción de decisiones equivocadas, inseguridad operativa y pérdida de competitividad y resiliencia en el destino.

AGRADECIMIENTOS

Esta aportación se ha realizado en el marco del Proyecto de Generación del Conocimiento PID2023-148550OB-I00 del PEICTI 2021-2023 (financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades) y del Grup de Recerca Consolidat Territori, Turisme i Canvi Climàtic de la Generalitat de Catalunya.

REFERENCIAS

Becken, S. (2019). Decarbonising tourism: Mission impossible? *Tourism Recreation Research,* 44(4), 419-433.

Becken, S., Whittlesea, E., Loehr, J., & Scott, D. (2020). Tourism and climate change: Evaluating the extent of policy integration. *Journal of Sustainable Tourism,* 28(10), 1603-1624.

Füssel, H.M., & Klein, R.J.T. (2006). Climate change vulnerability assessments: An evolution of conceptual thinking. *Climatic Change,* 75, 301-329.

Gómez-Martín, M.B. (2017). Retos del turismo español ante el cambio climático. *Investigaciones Geográficas,* 67, 31-47.

Gómez-Martín, M.B. (2025). La acción climática en la planificación turística a escala local. En *Técnicas y herramientas de planificación territorial sostenible de destinos turísticos* (pp. 375-392). Tirant lo Blanch.

Joppe, M. (2018). Tourism policy and governance: Quo vadis? *Tourism Management Perspectives,* 25, 201-204.

Mínguez, C., & Ricart, S. (2024). Is the tourism perspective envisaged in climate change adaptation planning? Evaluating the road map of political, social and environmental dimension in Spanish Destinations. In *Tourism and climate change in the 21st century: Challenges and solutions* (pp. 65-91). Cham: Springer Nature Switzerland.

Santos-Lacueva, R., Antón Clavé S., & Saladié, Ò. (2017). The Vulnerability of Coastal Tourism Destinations to Climate Change: The Usefulness of Policy Analysis. *Sustainability,* 9(11), 2062.

Tanrisever, C., Pamukçu, H., & Baydeniz, E. (2024). Climate Change in Tourism: understanding the impacts and opportunities for sustainability. In *Future Tourism Trends Volume 1: Tourism in the Changing World* (pp. 33-45). Emerald Publishing Limited.

LA INFLUENCIA DE LA PRECIPITACIÓN EN LA MOVILIDAD CICLISTA URBANA: IMPLICACIONES PARA LA GESTIÓN ADAPTATIVA A PARTIR DEL CASO DE BARCELONA

Antoni CARNEROS ESCUDERO[1]

[1]*Universitat de Barcelona*

toni.carneros@ub.edu

RESUMEN

El crecimiento progresivo de la movilidad ciclista en las ciudades se ha convertido en un indicador clave del éxito de las políticas públicas urbanas orientadas a la sostenibilidad. Sin embargo, la evolución del uso de la bicicleta suele interpretarse a partir de factores socioeconómicos, infraestructurales o normativos, infravalorando el papel de la meteorología. Este trabajo plantea la necesidad de incorporar la precipitación en la interpretación y gestión de la movilidad ciclista urbana. Para ello, analiza el uso de la bicicleta en Barcelona durante dos años completos, a partir de datos procedentes de contadores automáticos y del sistema público compartido Bicing. Estos datos se relacionan con los registros meteorológicos para identificar cómo la elevada variabilidad de la precipitación en esta ciudad mediterránea afecta a la demanda ciclista. Los resultados muestran que la precipitación ejerce una influencia significativa sobre el uso de la bicicleta, con reducciones especialmente acusadas durante periodos húmedos persistentes o bajo lluvia intensa. De este modo, una mayor frecuencia de estos episodios puede condicionar la lectura de las cifras anuales al generar estancamientos o descensos coyunturales, incluso en contextos de crecimiento estructural. Se concluye que incorporar la información pluviométrica en los sistemas de seguimiento de la movilidad ciclista mejora la interpretación de su evolución y favorece una gestión más adaptativa de las políticas de movilidad sostenible.

Palabras clave: Barcelona, movilidad ciclista, precipitación, adaptación, resiliencia.

ABSTRACT

The progressive growth of cycling in cities has become a key indicator of the success of sustainability-oriented public policies. However, trends in bicycle use are typically interpreted based on socioeconomic, infrastructural or regulatory factors, often overlooking the role of weather conditions. This study highlights the need to incorporate precipitation into the interpretation and management of urban cycling mobility. To this end, it analyses bicycle use in Barcelona over a two-year period using data from automatic counters and the public bike-sharing system Bicing. These data

are combined with meteorological records to examine how the high variability of precipitation in this Mediterranean city affects cycling demand. The results show that precipitation has a significant influence on bicycle use, particularly reducing it during periods of persistent rainfall or intense rain events. Consequently, an increased frequency of such conditions may affect the interpretation of annual figures by generating temporary stagnations or declines in demand, even within a context of structural growth in cycling. It is concluded that incorporating precipitation data into urban mobility monitoring systems improves the interpretation of cycling trends and supports more adaptive management of sustainable mobility policies.

Key words: Barcelona, urban cycling, precipitation, adaptation, resilience.

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, la movilidad ciclista ha experimentado un crecimiento progresivo en numerosas ciudades, impulsado por políticas públicas orientadas a la promoción del transporte sostenible. Este proceso ha convertido el uso de la bicicleta en un indicador clave del éxito tanto de la transformación de las dinámicas urbanas como de la eficacia de dichas políticas. No obstante, las variaciones en esta tendencia se han interpretado tradicionalmente a partir de factores socioeconómicos, infraestructurales o normativos (Thomas et al., 2013), prestando menor atención al papel de la meteorología. Aunque se ha demostrado la influencia de las condiciones atmosféricas sobre la movilidad ciclista (Böcker et al., 2013; Gebhart & Noland, 2014; Miranda-Moreno & Nosal, 2011), esta suele considerarse un elemento coyuntural asociado a episodios concretos, más que como un factor capaz de incidir en la lectura de su evolución a medio y largo plazo.

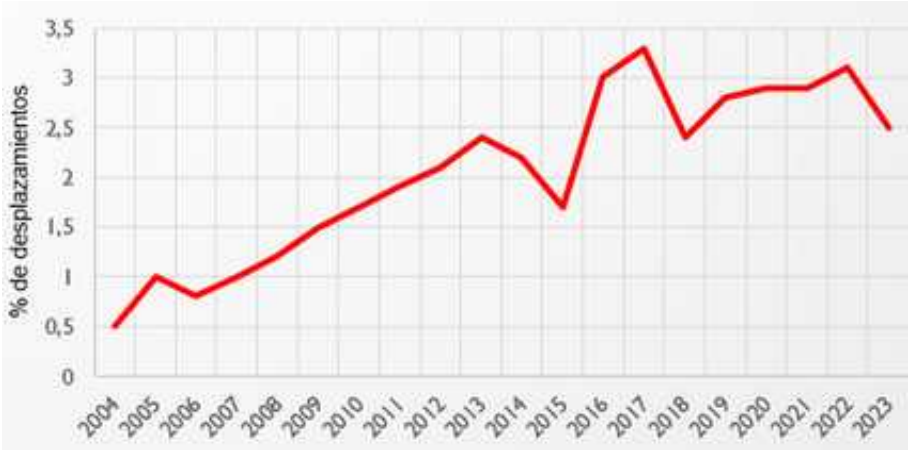


Figura 1. Evolución del uso relativo de la bicicleta en Barcelona. Fuente: EMEF.

En este contexto, la variabilidad interanual de la precipitación adquiere especial relevancia, ya que puede generar fluctuaciones significativas en la demanda ciclista que no responden necesariamente a cambios estructurales (Figura 1). El presente trabajo analiza su influencia en el uso de la bicicleta en la ciudad de Barcelona, cuyo clima mediterráneo se caracteriza por una elevada irregularidad pluviométrica, con el objetivo de contribuir a una mejor interpretación de su evolución y a la integración de esta variable en los sistemas de seguimiento y evaluación de la movilidad.

METODOLOGÍA

El estudio analiza el uso de la bicicleta en Barcelona durante los años 2022 y 2023 a partir de los registros de desplazamiento procedentes de las 519 estaciones del sistema de bicicletas compartidas Bicing y de 28 contadores automáticos de la red de carriles bici distribuidos por toda la ciudad. Esta información se ha puesto en relación con los datos pluviométricos del mismo periodo registrados por 7 estaciones meteorológicas oficiales ubicadas en la ciudad y su entorno inmediato, previamente interpolados en función de la ubicación de cada registro de desplazamiento, con el objetivo de asignar valores más representativos de las condiciones locales. La comparación se ha realizado con una resolución temporal diaria y de 30 minutos, lo que permite captar con precisión la respuesta de la demanda ciclista a las condiciones meteorológicas en diferentes contextos.

RESULTADOS

Los resultados muestran que la precipitación ejerce una influencia significativa sobre la movilidad ciclista en Barcelona, con efectos que varían según la resolución temporal del análisis.

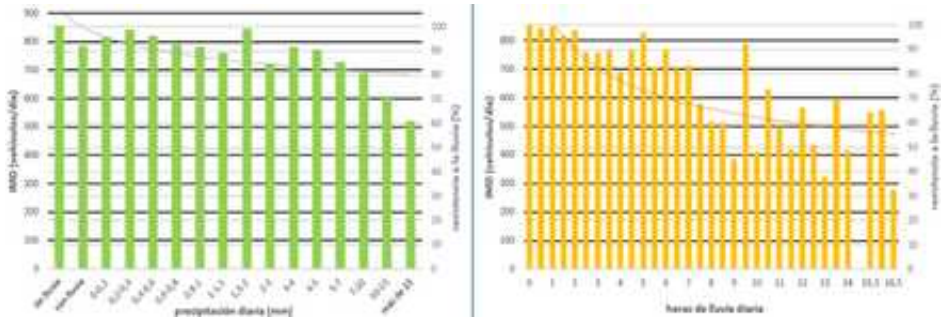


Figura 2. Movilidad ciclista media diaria en función de la precipitación acumulada (izquierda) y de la duración de la lluvia (derecha). La línea representa la tendencia visual obtenida mediante ajuste polinómico. Elaboración propia.

A escala diaria, los días con lluvia se asocian a una reducción media del uso de la bicicleta del 8,3 % respecto a los días secos (Figura 2). Este efecto aumenta con la precipitación acumulada y su duración. Así, en días con menos de 0,6 mm de lluvia la movilidad disminuye menos del 5 %, frente al 39,1 % con más de 15 mm. Del mismo modo, los descensos no superan el 2 % cuando la lluvia dura menos de una hora diaria, pero alcanzan el 67,3 % en jornadas con más de 16,5 horas de precipitación.

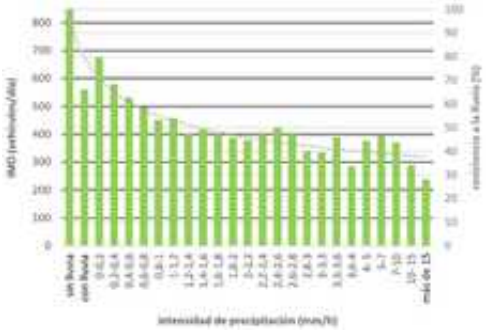


Figura 3. Movilidad ciclista media en 30 minutos en función de la intensidad de la precipitación. La línea representa la tendencia visual obtenida mediante ajuste polinómico. Elaboración propia.

El análisis con resolución temporal de 30 minutos muestra con mayor detalle la respuesta de la movilidad ciclista a la lluvia, con una reducción media del 33,9 % en los intervalos con precipitación respecto a los secos (Figura 3). Este impacto aumenta con la intensidad, pasando del 20,7 % en situaciones de lluvia muy débil al 71,9 % con más de 15 mm/h. Se evidencia así una elevada sensibilidad de la demanda ciclista a la precipitación, especialmente a escalas temporales cortas, quedando parcialmente diluidos los efectos en análisis más agregados.

DISCUSIÓN

Los resultados confirman que la precipitación constituye un factor clave en la movilidad ciclista urbana, no solo por su efecto inmediato sobre el uso de la bicicleta, sino también por su capacidad para alterar la interpretación de sus tendencias a medio y largo plazo. Este efecto resulta especialmente relevante en climas como el mediterráneo, caracterizados por una elevada variabilidad pluviométrica, pues episodios prolongados de lluvia pueden generar desviaciones respecto a la evolución esperada de la movilidad, e incluso descensos puntuales que no responden necesariamente a cambios estructurales. En este sentido, considerar la meteorología como un factor exclusivamente coyuntural puede conducir a interpretaciones erróneas de la demanda ciclista. Por ello, resulta necesario incorporar de forma explícita la información meteorológica en los sistemas de seguimiento de la movilidad, con el fin de contextualizar las variaciones observadas y favorecer el diseño de políticas más adaptativas ante una creciente variabilidad climática.

Los resultados deben interpretarse teniendo en cuenta que el análisis se limita a dos años de observación extremadamente secos en Barcelona, lo que no ha permitido evaluar el posible efecto diferencial de años, estaciones o meses especialmente húmedos, en los que la influencia de la precipitación podría resultar aún más significativa. Asimismo, debe tenerse en cuenta que los datos procedentes de contadores automáticos de la red de carriles bici incluyen tanto bicicletas como vehículos de movilidad personal, y que los usuarios del sistema de bicicleta pública Bicing presentan una mayor sensibilidad a la precipitación que el conjunto de la movilidad ciclista, por lo que ambas fuentes reflejan comportamientos parcialmente diferenciados.

CONCLUSIONES

La precipitación reduce de forma significativa el uso de la bicicleta. Este efecto depende en gran medida de la intensidad y la duración de la lluvia, y se manifiesta tanto a escala diaria como, con mayor claridad, en intervalos cortos, donde la respuesta es inmediata. En consecuencia, la variabilidad pluviométrica puede generar fluctuaciones en la movilidad ciclista que no responden necesariamente a cambios estructurales, lo que puede condicionar su evolución temporal y dificultar la interpretación de las tendencias observadas. Por ello, la incorporación de la información meteorológica en los sistemas de análisis y seguimiento de la movilidad ciclista resulta clave para mejorar los diagnósticos y avanzar hacia políticas públicas más adaptativas.

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece al Ayuntamiento de Barcelona por facilitar los datos utilizados en este estudio.

REFERENCIAS

Böcker, L., Dijst, M., & Prillwitz, J. (2013). Impact of everyday weather on individual daily travel behaviours. Transport Reviews, 33(1), 71–91.

Gebhart, K., & Noland, R. B. (2014). The impact of weather conditions on bikeshare trips. Transportation, 41, 1205–1225.

Miranda-Moreno, L. F., & Nosal, T. (2011). Weather or not to cycle. Transportation Research Record, 2247(1), 42–52.

Thomas, T., Jaarsma, R., & Tutert, S. (2013). Temporal fluctuations of cycling demand. Transportation, 40(1), 1–22.

VULNERABILIDAD SOCIOECONÓMICA ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO A NIVEL MUNICIPAL: LA NECESIDAD DE UN CAMBIO EN LOS ESTILOS DE DESARROLLO. EL CASO DE SAN CRISTÓBAL DE LA LAGUNA

Alejandro Samuel HERRERA HERNÁNDEZ[1],
Francisco José DE ARMAS CASTELLANO[1], Emilio BONAL PÉREZ[1],
Juan Israel GARCÍA CRUZ[1] y Serafín CORRAL QUINTANA[1]

[1] *Grupo de Investigación PENSARES, Universidad de La Laguna (ULL)*

alu0101235400@ull.edu.es; alu0101330327@ull.edu.es;
alu0101034034@ull.edu.es; jgarciac@ull.edu.es; scorral@ull.edu.es

RESUMEN

La climatología regional ha producido un cuerpo de conocimiento biofísico cada vez más preciso, que sólo adquiere relevancia política cuando se reconoce que los fenómenos físicos extremos se convierten en daño efectivo al atravesar las condiciones materiales e institucionales de las personas y los territorios sobre los que actúan. Para San Cristóbal de La Laguna (Tenerife), este trabajo propone leer la fragilidad climática como multi-vulnerabilidad: una condición territorial preexistente, plural y socialmente producida que el clima no genera, pero sí intensifica. El análisis articula dos finalidades complementarias —comparativa y cualitativa-explicativa— sobre una misma arquitectura de catorce variables a escala de sección censal (n = 113), y la contrasta con las percepciones, propuestas y quejas vecinales sistematizadas por el Barómetro de La Laguna 2023–2025. La incorporación del Barómetro responde a una exigencia simultáneamente epistemológica y democrática, en la línea de la post-normal science formulada por Funtowicz y Ravetz (1993). La lectura cruzada sugiere una correspondencia interpretativa entre las áreas de mayor multi-vulnerabilidad y los ámbitos de mayor malestar ciudadano —vivienda, soledad, salud mental, precariedad—, frente a un núcleo de bienestar que la ciudadanía sitúa en bienes mayoritariamente no mercantiles. Esa tensión motiva una pregunta normativa: si lo que las personas reconocen como prosperidad se sostiene, en proporción no menor, fuera del crecimiento económico, las políticas climáticas deben reabrir el debate sobre los estilos de desarrollo desde el postcrecimiento, la coproducción de conocimiento y la participación ciudadana.

Palabras clave: multi-vulnerabilidad, cambio climático, prosperidad, postcrecimiento, coproducción, sección censal.

ABSTRACT

Regional climatology has produced an increasingly precise body of biophysical knowledge that becomes politically relevant only when extreme physical phenomena

turn into effective harm by traversing the material and institutional conditions of the people and territories upon which they act. For San Cristóbal de La Laguna (Tenerife) this paper proposes to read climate fragility as multi-vulnerability: a pre-existing, plural and socially produced territorial condition that climate does not generate but does intensify. The analysis articulates two complementary purposes —comparative and qualitative-explanatory— over a shared architecture of fourteen variables at the census-tract level (n = 113), and contrasts the diagnoses with the perceptions, proposals and complaints gathered by the La Laguna Barometer 2023–2025. The Barometer is mobilised on simultaneously epistemological and democratic grounds, in line with the post-normal science formulated by Funtowicz and Ravetz (1993). The cross-reading suggests an interpretive correspondence between areas of highest multi-vulnerability and domains of strongest citizen distress —housing, loneliness, mental health, precariousness— against a core of well-being that citizens locate predominantly in non-market goods. This tension prompts a normative question: if what people recognise as prosperity rests, to a non-trivial extent, beyond the metric of economic growth, climate policy must reopen the debate on development trajectories through post-growth, knowledge co-production and citizen participation.

Key words: multi-vulnerability, climate change, prosperity, post-growth, co-production, census tract.

INTRODUCCIÓN

Las ciencias del clima han producido en las últimas décadas un cuerpo de conocimiento biofísico de una solidez sin precedentes: proyecciones regionales, atribución y escenarios coordinados (IPCC, 2022). Ese conocimiento, sin embargo, sólo adquiere relevancia política cuando se reconoce que los fenómenos físicos extremos se convierten en daño efectivo al atravesar las condiciones sociales en las que se inscriben. La ola de calor europea de 2003 se saldó con cerca de 70.000 muertes excedentes, concentradas en personas mayores que vivían solas en viviendas con escaso aislamiento térmico (Robine et al., 2008); la ola de calor de Chicago de 1995 mostró, en la autopsia social de Klinenberg (2002), que la mortalidad no se distribuyó con la temperatura sino con la configuración social de los barrios. Es a esta dimensión social a la que apelan O'Keefe et al. (1976) cuando recuerdan que sin pueblo no hay desastre.

Sobre esta base, una tradición consolidada de literatura crítica ha conceptualizado la vulnerabilidad como condición preexistente —histórica, política, institucional, material — que el clima atraviesa y revela (Adger, 1999, 2006; Wisner et al., 2004; O'Brien et al., 2007; Cutter et al., 2003). Un meta-análisis reciente de 74 estudios (1999–2025) muestra que el campo no converge sobre una definición única: la vulnerabilidad opera como objeto fronterizo cuya estabilización depende menos de definiciones canónicas

que de un repertorio de arquitecturas metodológicas que la hacen comparable, gobernable y gobernada. (Herrera y Corral, en revisión). Sobre este diagnóstico proponemos articular el concepto de multi-vulnerabilidad, que recoge simultáneamente tres rasgos que la literatura ha distinguido por separado: el carácter multidimensional de las condiciones que producen fragilidad, la naturaleza multi-estresor del clima y la pluralidad ontológica del propio concepto de vulnerabilidad. El término no sustituye al de vulnerabilidad socioeconómica al cambio climático: lo tensa en una dirección más productiva en términos operativos —para el análisis territorial a escala desagregadas y para el diálogo con la ciudadanía— y exige, por lo tanto, un abordaje deliberadamente holístico y transdisciplinar. El análisis articula dos finalidades complementarias y a menudo tensionadas (Timmerman, 1981; Füssel, 2007; O'Brien et al., 2007) sobre una misma arquitectura de variables. La finalidad comparativa ordena territorios sobre una métrica común y soporta la priorización política. La finalidad cualitativa-explicativa permite inferir, a partir de los datos, los procesos socioeconómicos e institucionales que producen cada configuración: los índices priorizan, no explican, y por ello requieren la lectura cualitativa que evita naturalizar como dato lo que es resultado de un proceso.

La unidad de análisis seleccionada es la sección censal, fundamentada en que la heterogeneidad de las variables determinantes para la adaptación presenta una variabilidad significativa a nivel intramunicipal. Si bien una parte considerable de la literatura sobre vulnerabilidad opera en escalas macro (continental o nacional), este enfoque resulta insuficiente para el diseño de estrategias de adaptación climática. Siguiendo a Francini et al. (2020), las evaluaciones a gran escala permiten cuantificar el impacto genérico, pero su resolución es inadecuada para la transferencia de resultados a políticas públicas locales, al no capturar las especificidades socioeconómicas y biofísicas del tejido urbano. Por tanto, es imperativa una escala de observación local que permita identificar las discontinuidades socio-espaciales y los microclimas urbanos que definen el riesgo real. San Cristóbal de La Laguna ofrece, por su multi-diversidad, un caso particularmente fértil: diversidad territorial (costa, espacio rural, núcleos urbanos, casco patrimonial, ciudad universitaria y periferias periurbanas), diversidad económica (rentas bajas y dependencia institucional en el sur, tejido mixto con desigualdad mayor en el centro, clase media relativamente estable en el norte), diversidad social (envejecimiento concentrado en el casco, juventud universitaria en el centro, estructuras demográficas más mixtas en el sur) y diversidad ambiental (intensificación térmica y aridez con variaciones a una escala muy fina, dentro del propio término municipal). El diagnóstico se contrasta con el Barómetro La Laguna 2023–2025, dispositivo participativo que recoge percepciones, propuestas y quejas vecinales: las políticas dirigidas a reducir la multi-vulnerabilidad —vivienda, empleo, demografía, parque construido, salud— son inviables sin la deliberación con quienes habitarán sus efectos, en la línea de la post-normal science formulada por Funtowicz y Ravetz (1993): cuando los hechos son inciertos, los valores

están en disputa , los riesgos son altos y las decisiones son urgentes e irreversibles, la legitimidad y la eficacia de la política pública dependen de su sometimiento a una comunidad extendida de pares.

METODOLOGÍA

2.1. Arquitectura común de variables.

La arquitectura analítica organiza catorce variables en tres dimensiones —económica, demográfica y edificatoria— y once subdimensiones, alineadas con los componentes de sensibilidad y capacidad adaptativa del IPCC AR6 (2022). La dimensión económica opera principalmente como capacidad de adaptación; las dimensiones demográfica y edificatoria, como sensibilidad, y la dimensión climática, como exposición. Sostener las dos finalidades sobre la misma arquitectura es condición necesaria para que el índice y la lectura cualitativa no hablen de objetos distintos. La Tabla 1 sintetiza esta arquitectura.

Dimensión	Subdimensión	Variable(s)	Significado
Económica (capacidad adaptativa)	Renta · Pobreza · Desigualdad	RNMP · PUC75 · GINI	Renta neta media por persona; % población <7.500 €/año por unidad de consumo; índice de Gini
	Fuentes de ingreso	PSAL · PPEN · PDES · PORTP · PORTI	% del ingreso por salarios, pensiones, desempleo, otras prestaciones y otros ingresos no clasificables
Demográfica (sensibilidad)	General · Juventud · Envejecimiento · Aislamiento	POB · PESP · PP18 · PP65 · PHU	Población; % nacionalidad española; % menores 18; % mayores 65; % hogares unipersonales
Edificatoria (sensibilidad)	Antigüedad	Pre-80	% de edificaciones anteriores a 1980 (NBE-CT-79)
Climática (exposición)	Temperaturas máximas, mínimas y aridez	Temperaturas máximas, mínimas y aridez para los escenarios proyectados a finales y medio siglo	Valores térmicos extremos y niveles de estrés hídrico proyectados bajo escenarios de emisiones (RCP/SSP) para los horizontes 2050 y 2100.

Tabla 1. Arquitectura común de variables. La dimensión edificatoria queda restringida a Pre-80, asumiendo de forma explícita las limitaciones del dato catastral. Fuente: elaboración propia a partir de la ontología del proyecto PENSARES (2025).

2.2. Dos finalidades sobre la misma arquitectura.

La finalidad comparativa se materializa en un Índice de Multi-Vulnerabilidad (IDMV). El protocolo de agregación se apoya en una normalización estandarizada de las variables y en una ponderación equitativa entre dimensiones y subdimensiones, complementada por un análisis de sensibilidad que documenta el efecto de las decisiones de ponderación; la elección no se presenta como neutralidad sino como compromiso normativo explícito (Eakin y Bojórquez-Tapia, 2008; Hinkel, 2011; Tate, 2012). La finalidad cualitativa-explicativa lee la misma arquitectura como una red de interacciones —triada de pobreza energética en la vejez (PP65 + PHU + Pre-80 + RNMP baja), pobreza juvenil estructural (PP18 + PUC75 + PORTP), dualidad del PORTI, entre otros— a partir de las cuales se infieren los procesos que han producido cada patrón territorial. Ambas finalidades operan sobre un protocolo replicable y transferible al resto del archipiélago.

2.3. El Barómetro La Laguna como interlocutor.

El Barómetro es el dispositivo participativo del Foro Económico y Social del Ayuntamiento y la Universidad de La Laguna, hoy en su tercera edición (2023, 2024 y 2025), e integra encuesta telefónica representativa, talleres sectoriales, cuestionarios itinerantes y reuniones presenciales en las que vecinas y vecinos se han expresado libremente, formulando propuestas y articulando quejas sobre su distrito (Corral Quintana et al., 2025). La unidad territorial del Barómetro es el distrito (n = 6), notablemente más agregada que la sección censal (n = 113); en consecuencia, el cruce que aquí se propone es interpretativo y cualitativo, orientado a contrastar dos visiones —la del análisis territorial y la del relato vecinal— a la luz de la pregunta sobre la prosperidad. Su valor analítico no reside en validar el índice ni en colmar sus silencios, sino en abrir un segundo plano de evidencia que la métrica, por sí sola, no puede ofrecer.

RESULTADOS

3.1. Lectura comparativa.

El IDMV revela una distribución acusadamente desigual de la multi-vulnerabilidad en el municipio. Los gradientes más altos se concentran en el eje sur-suroeste —Taco, San Matías, El Cardonal, San Jerónimo y San Miguel de Chimisay—, prolongado hacia el sureste (La Cuesta, La Candelaria y Finca España), con enclaves puntuales en el centro urbano (La Verdellada y secciones de San Honorato) y un patrón de menor magnitud, pero igualmente significativo en el norte costero y rural. La incorporación de las capas climáticas no altera la geometría general del diagnóstico en los horizontes próximos; bajo el escenario RCP 8.5 (2090–2099), en cambio, la intensificación térmica se generaliza sobre el suelo edificado y la reducción de las precipitaciones se reparte de forma sensiblemente homogénea, separando con nitidez un componente común creciente —la presión climática aumenta para todas las áreas del municipio— de un componente diferencial —la capacidad de soportarla y responder se distribuye de manera profundamente desigual—.

3.2. Lectura cualitativa-explicativa.

En el sur-suroeste se identifica con nitidez el patrón de pobreza infantil estructural (PP18 elevado, RNMP baja, PUC75 alta y peso significativo de PORTP y PDES en la composición de la renta) y reaparece la igualdad por pobreza: un Gini moderado convive con rentas inferiores a 10.000 €, lo que sólo describe equidad si se ignora que casi nadie alcanza la renta suficiente para desigualarse. En enclaves del centro urbano se observa la triada de pobreza energética en la vejez (PP65 alto, PHU alto, Pre-80 dominante y RNMP reducida), configuración asociada en la literatura con tasas elevadas de morbilidad y mortalidad durante eventos térmicos extremos (Klinenberg, 2002; Reid et al., 2009; Cutter y Finch, 2008). En el norte costero y rural se identifica una fragilidad estructural de baja intensidad: rentas relativamente estables, peso

elevado de pensiones, parque heterogéneo y presencia significativa de hogares unipersonales en aislamiento residencial. Estas tres configuraciones permiten inferir los procesos —precariedad laboral sostenida, dependencia institucional acumulada, envejecimiento sin red, parque obsoleto sin rehabilitación y presión inmobiliaria— que han producido cada patrón territorial.

3.3. Voces ciudadanas.

El Barómetro La Laguna 2023–2025 permite formular varias correspondencias relevantes con la cautela que impone la asimetría escalar entre fuentes (Tabla 2). La dimensión edificatoria de la multi-vulnerabilidad encuentra una traducción muy directa en la centralidad ciudadana de la vivienda: primera preocupación espontánea de la población (20,7 %), primera propuesta itinerante (7,9 % de las 365 aportaciones recogidas) y, entre las personas jóvenes, principal problema generacional, identificado por el 53,9 % junto al empleo (44,8 %). Las dimensiones demográficas encuentran un correlato consistente en un conjunto de indicadores sociosanitarios: el 23,8 % de las personas encuestadas declara haberse sentido sola en el último mes, el 33,6 % estresada y el 31,3 % con dificultades de sueño, mientras que la atención a la tercera edad concentra el 4,7 % de las propuestas itinerantes. Las fragilidades económicas reaparecen en demandas sobre servicios sociales y empleo digno y, particularmente, en las quejas vecinales sobre transporte público y servicios urbanos básicos formuladas en los distritos de menor RNMP.

Dimensión multi-vulnerabilidad	Configuración territorial inferida	Eco en el discurso ciudadano (Barómetro 2023–2025)
Económica	Pobreza juvenil estructural en el suroeste; igualdad por pobreza; bolsas de precariedad en enclaves centrales	Empleo y vivienda como problemas juveniles (44,8 % y 53,9 %); servicios sociales (14,0 %); quejas sobre transporte y servicios
Demográfica	Triada de pobreza energética en la vejez en enclaves centrales y casco; fragilidad de baja intensidad en el norte	Soledad (23,8 %), estrés (33,6 %), dificultades de sueño (31,3 %); atención a la tercera edad (4,7 %); demanda de salud mental
Edificatoria	Parque obsoleto en suroeste, casco histórico y enclaves centrales	Vivienda como primera preocupación espontánea (20,7 %) y primera propuesta itinerante (7,9 %)
Climática y de riesgos naturales	Componente común creciente (RCP 8.5 2090–2099) sobre todo el suelo edificado, con reducción homogénea de precipitaciones	Sensibilidad ambiental emergente: sostenibilidad como eje transversal en talleres; el cambio climático apenas se nombra de manera explícita

Tabla 2. Correspondencia interpretativa entre la lectura cualitativa-explicativa de la multi-vulnerabilidad y los registros del discurso ciudadano. Fuente: elaboración propia a partir de Corral-Quintana et al. (2025).

Junto a estas correspondencias, los datos del Barómetro autorizan una observación que orienta la discusión normativa. Los aspectos mejor valorados de vivir en La Laguna son el clima (21,3 %), la calidad de vida (21,0 %) y la tranquilidad (19,4 %), seguidos por la cultura, las tradiciones, la movilidad peatonal y las zonas verdes: bienes ambientales, relacionales y comunitarios que no se intercambian en el mercado y que ningún indicador estrictamente monetario captura. Los ámbitos en los que se concentra el malestar son, por contraste, predominantemente materiales y monetarios —vivienda, empleo, salud mental—, y coinciden territorialmente con las configuraciones de la multi-vulnerabilidad. La distribución del bienestar y la del

malestar no son, por tanto, simétricas: la primera se sostiene fuera del mercado, la segunda lo atraviesa.

DISCUSIÓN

La conjunción de las tres lecturas autoriza reformular la cuestión inicial. El cambio climático no produce las fragilidades sobre las que actúa: las recibe, las atraviesa y las exacerba. Una política climática eficaz no puede sostenerse, por tanto, sólo sobre la mejora de las proyecciones físicas, ni siquiera sólo sobre la sofisticación de los índices: debe internalizar las trayectorias de desarrollo que han producido los paisajes de fragilidad. En el plano conceptual, la noción de multi-vulnerabilidad permite articular las dos finalidades sobre una misma arquitectura, manteniendo visible el carácter normativo de toda decisión de agregación (Hinkel, 2011; Tate, 2012). En el plano metodológico, la asimetría escalar entre el análisis territorial y el Barómetro impide la inferencia estadística pero habilita una lectura interpretativa de gran densidad: la ciudadanía no nombra el cambio climático en sus corpus discursivos, pero sí sus efectos sociales —vivienda inalcanzable, soledad, malestar térmico, precariedad—, una divergencia categorial que confirma desde el otro lado la lectura de O'Keefe et al. (1976) y Tschakert et al. (2017): las dimensiones del cambio climático con relevancia social se manifiestan, en la experiencia cotidiana, como problemas sociales.

La política de adaptación, por ello, no puede agotarse en su dimensión física. Las medidas de obra —diques, infraestructura verde, refrigeración pasiva o activa, materiales de aislamiento térmico— son condición necesaria pero no suficiente: las geografías de fragilidad aquí descritas no se resuelven sólo con infraestructura. Una adaptación efectiva exige atacar simultáneamente las causas socioeconómicas e institucionales subyacentes que producen la diferencia adaptativa. En el plano normativo, los datos del Barómetro habilitan una pregunta de fondo: si las y los laguneros sitúan su prosperidad en bienes que el crecimiento económico no produce ni protege automáticamente —clima, comunidad, paisaje, tiempo, tranquilidad—, mientras que los déficits que se traducen en sufrimiento son fundamentalmente monetarios, los indicadores estrictamente monetarios serán sistemáticamente parciales, y las políticas que dependan de su crecimiento podrán erosionar precisamente aquello que la población identifica como bienestar (Adger, 2010; Jackson, 2009). El debate sobre el postcrecimiento (Kallis, 2018) deja de ser, en este registro, un horizonte abstracto para convertirse en una pregunta concreta sobre las dinámicas regionales —turistificación, presión inmobiliaria, dependencia de rentas externas— que han producido las geografías de fragilidad descritas.

CONCLUSIONES

La vulnerabilidad climática en San Cristóbal de La Laguna es indisociable de un

patrón territorial de desigualdad que se hace visible a través de tres registros convergentes: la lectura comparativa identifica los gradientes de fragilidad acumulada; la lectura cualitativa-explicativa infiere los procesos socioeconómicos e institucionales que los han producido; el discurso ciudadano traduce esa fragilidad técnica en preocupaciones cotidianas. Aceptadas las cautelas inherentes a un único caso de estudio y a la asimetría escalar entre fuentes, los resultados sostienen una conclusión de orden teórico-práctico: la política climática justa exige redefinir su pregunta de fondo —no únicamente cómo proteger lo existente del clima, sino cómo proteger una prosperidad cuya sustancia se sitúa, en proporción no menor, fuera del crecimiento económico—. Esa redefinición se apoya en tres líneas convergentes: la coproducción de conocimiento entre vecindades, instituciones y academia como condición simultánea de legitimidad y de eficacia (Funtowicz y Ravetz, 1993); la integración explícita del diagnóstico de multi-vulnerabilidad en instrumentos como el PACES municipal, con medidas formuladas en categorías cercanas a la experiencia ciudadana —rehabilitación residencial, redes de cuidado, vivienda asequible, agricultura de proximidad y energía comunitaria—; y la apertura de un debate público sobre los estilos de desarrollo que han producido las geografías de fragilidad. No podemos diagnosticar fragilidades sin preguntar para qué bienestar nos protegemos, ni adaptarnos al cambio climático sin reabrir la pregunta sobre el modelo de desarrollo que lo ha producido.

AGRADECIMIENTOS

Trabajo enmarcado en la investigación sobre multi-vulnerabilidades del Grupo PENSARES (ULL) y en el Barómetro de La Laguna, promovido por el Foro Económico y Social del Ayuntamiento de San Cristóbal de La Laguna y del Grupo PENSARES (ULL). Se agradece enormemente al Grupo GOTA-ULL su trabajo y la cesión de las proyecciones climáticas regionalizadas.

REFERENCIAS

Adger, W. N. (1999). Social vulnerability to climate change and extremes in coastal Vietnam. World Development, 27(2), 249–269.

Adger, W. N. (2006). Vulnerability. Global Environmental Change, 16(3), 268–281.

Adger, W. N. (2010). Climate change, human well-being and insecurity. New Political Economy, 15(2), 275–292.

Corral Quintana, S., González de la Rosa, M., Bonal Pérez, E., y Vázquez Mínguez, J. M. (2025). Barómetro 2025: La Laguna propone. Foro Económico y Social del Ayuntamiento de San Cristóbal de La Laguna y Universidad de La Laguna.

Cutter, S. L., Boruff, B. J., y Shirley, W. L. (2003). Social vulnerability to environmental hazards. Social Science Quarterly, 84(2), 242–261.

Cutter, S. L., y Finch, C. (2008). Temporal and spatial changes in social vulnerability to natural hazards. Proceedings of the National Academy of Sciences, 105(7), 2301–2306.

Eakin, H., y Bojórquez-Tapia, L. A. (2008). Insights into the composition of household vulnerability from multicriteria decision analysis. Global Environmental Change, 18(1), 112–127.

Francini, M., Chieffallo, L., Palermo, A., y Viapiana, M. F. (2020). A method for the definition of local vulnerability domains to climate change in a GIS environment based on spatial multi-criteria decision analysis. Sustainability, 12(22), 9454.

Funtowicz, S. O., y Ravetz, J. R. (1993). Science for the post-normal age. Futures, 25(7), 739–755.
Füssel, H.-M. (2007). Vulnerability: A generally applicable conceptual framework for climate change research. Global Environmental Change, 17(2), 155–167.

Herrera, A. y Corral, S. (en revisión). Making Vulnerability Comparable: A Meta-Analysis of Socio-Economic Climate Change Assessment Methods. Environmental Science & Policy.

Hinkel, J. (2011). “Indicators of vulnerability and adaptive capacity”: Towards a clarification of the science–policy interface. Global Environmental Change, 21(1), 198–208.

Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC]. (2022). Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Cambridge University Press.

Jackson, T. (2009). Prosperity Without Growth: Economics for a Finite Planet. Earthscan.

Kallis, G. (2018). Degrowth. Agenda Publishing.

Klinenberg, E. (2002). Heat Wave: A Social Autopsy of Disaster in Chicago. University of Chicago Press.

O’Brien, K., Eriksen, S., Nygaard, L. P., y Schjolden, A. (2007). Why different interpretations of vulnerability matter in climate change discourses. Climate Policy, 7(1), 73–88.

O'Keefe, P., Westgate, K., y Wisner, B. (1976). Taking the naturalness out of natural disasters. Nature, 260(5552), 566–567.

Pérez, J. C., Expósito, F. J., González, A., y Díaz, J. P. (2022). Climate projections at a convection-permitting scale of extreme temperature indices for an archipelago with a complex microclimate structure. Weather and Climate Extremes, 36, 100459.

Reid, C. E., O'Neill, M. S., Gronlund, C. J., et al. (2009). Mapping community determinants of heat vulnerability. Environmental Health Perspectives, 117(11), 1730–1736.

Robine, J.-M., et al. (2008). Death toll exceeded 70,000 in Europe during the summer of 2003. Comptes Rendus Biologies, 331(2), 171–178.

Tate, E. (2012). Social vulnerability indices: A comparative assessment using uncertainty and sensitivity analysis. Natural Hazards, 63(2), 325–347.

Timmerman, P. (1981). Vulnerability, resilience and the collapse of society. Institute for Environmental Studies, University of Toronto.

Tschakert, P., et al. (2017). Climate change and loss, as if people mattered: Values, places, and experiences. WIREs Climate Change, 8(5), e476.

Wisner, B., Blaikie, P., Cannon, T., y Davis, I. (2004). At Risk: Natural Hazards, People's Vulnerability and Disasters (2.ª ed.). Routledge.

FACTORES SOCIODEMOGRÁFICOS EN LA PERCEPCIÓN Y COMPRENSIÓN DE LOS AVISOS METEOROLÓGICOS Y LA ACTIVACIÓN DE LOS PLANES DE EMERGENCIA EN LAS ISLAS CANARIAS (ESPAÑA)

Fernando MEDINA MORALES[1], Alessandro INDELICATO[2], Pablo MÁYER SUÁREZ[1], Lorenzo QUESADA RUIZ[1]

[1] Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Grupo de Investigación en Geografía Física, Medio Ambiente y Tecnologías de la Información Geográfica (GEOTIGMA), Instituto de Oceanografía y Cambio Global (IOCAG.
[2] Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Departamento de Análisis de Economía Aplicada;

fernando.medina@ulpgc.es, alessandro.indelicato@ulpgc.es, pablo.mayer@ulpgc.es, lorenzo.quesada@ulpgc.es

RESUMEN

La efectividad de los sistemas de avisos meteorológicos está directamente relacionada con la comprensión y la respuesta de la ciudadanía. Esta investigación analiza la percepción del riesgo, el nivel de entendimiento y la confianza en los avisos meteorológicos de la AEMET y en los boletines de activación de los planes de emergencia de Protección Civil en las Islas Canarias, a partir de una encuesta estructurada a 902 personas. El estudio examina diversas variables sociodemográficas que influyen en la percepción de riesgo personal y familiar, así como en la incertidumbre durante la toma de decisiones. Los principales resultados muestran que, aunque el 73,9 % de los encuestados posee un buen conocimiento de los niveles de aviso de AEMET, solo el 41,4 % es capaz de distinguirlos de las activaciones de los planes de Protección Civil. Además, el 36,1 % declaró sentirse desorientado respecto a qué acciones debe realizar. El análisis de conglomerados identificó un grupo denominado “Informados y Confundidos” (43,8 %), que, pese a poseer conocimientos, se siente inseguro. La principal causa de esta incertidumbre es la “falta de claridad en las acciones recomendadas” (85,9 % de los motivos de confusión). Estos resultados evidencian la necesidad urgente de evolucionar desde mensajes meramente informativos hacia mensajes prescriptivos, que indiquen claramente las medidas de protección que deben adoptarse, además de reforzar la coordinación institucional entre los servicios meteorológicos y los organismos de protección civil para optimizar la respuesta ciudadana ante eventos meteorológicos extremos.

Palabras clave: Percepción del riesgo, comunicación del riesgo, alerta temprana, educación, avisos meteorológicos.

ABSTRACT

The effectiveness of weather warning systems is directly related to citizens' understanding and response. This research analyses risk perception, level of understanding, and trust in AEMET meteorological warnings and in the activation bulletins of Civil Protection emergency plans in the Canary Islands, through a structured survey of 902 respondents. It explores multiple sociodemographic variables influencing the perception of personal and family risk, as well as uncertainty in decision-making. The main findings show that while 73.9 % of respondents have a good knowledge of AEMET warning levels, only 41.4 % are able to distinguish them from Civil Protection emergency plan activations. Moreover, 36.1 % reported feeling disoriented about what actions to take. The cluster analysis identified a group called "Informed & Confused" (43.8 %), who, despite having knowledge, feel unsafe. The main cause of this uncertainty is the "lack of clarity in recommended actions" (85.9 % of confusion causes). These results highlight the urgent need to evolve weather communication from merely informative messages to prescriptive ones, clearly indicating protection measures, and strengthen institutional coordination between meteorological and civil protection agencies to optimize citizen response to extreme weather events.

Keywords: weather warning, risk perception, risk communication, early warning system, education, impact

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de alerta temprana constituyen una herramienta fundamental en la reducción del riesgo de desastres, especialmente en contextos de creciente frecuencia e intensidad de fenómenos meteorológicos extremos. Sin embargo, su eficacia no depende únicamente de la capacidad tecnológica para emitir avisos, sino de la forma en que estos son comprendidos e interpretados por la población. Diversos estudios han puesto de manifiesto la existencia de una brecha entre la emisión del aviso y la adopción de medidas de autoprotección (Bopp & Douvinet, 2020; McBride et al., 2023; Potter et al., 2018). Esta brecha está condicionada por factores sociales, cognitivos y comunicativos, tales como la percepción del riesgo, la confianza institucional, el conocimiento previo y la claridad del mensaje (Taylor et al., 2018). En el caso de España, esta problemática se ve acentuada por la coexistencia de dos sistemas diferenciados: por un lado, los avisos meteorológicos emitidos por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), de carácter técnico e informativo (tabla 1); y por otro, los boletines de activación de los planes de emergencia gestionados por los servicios de Protección Civil, de carácter operativo. Esta dualidad puede generar confusión en la población, dificultando la interpretación del riesgo y la adopción de decisiones adecuadas.

Nivel de aviso	Color	Descripción del riesgo
Amarillo 🟡	Riesgo bajo	Fenómenos poco habituales, pero sin peligro para la población en general.
Naranja 🟠	Riesgo importante	Fenómenos meteorológicos no habituales con potencial de daños y riesgo para actividades concretas.
Rojo 🔴	Riesgo extremo	Fenómenos excepcionales de intensidad muy alta con riesgo elevado para la población en general.

Tabla 1. Clasificación de avisos meteorológicos según el nivel de riesgo potencial.. Fuente: Elaboración propia a partir de Agencia Estatal de Meteorología (2025) y Meteoalarm (2025).

OBJETIVOS Y ÁMBITOS DE ESTUDIO

El objetivo principal de esta investigación es analizar los factores que influyen en la comprensión y percepción de los avisos meteorológicos y su traducción en comportamiento por parte de la ciudadanía. De manera específica, se pretende: (i) identificar las variables sociodemográficas que influyen en la percepción del riesgo, (ii) analizar el nivel de comprensión de los mensajes emitidos, y (iii) evaluar la capacidad de la población para distinguir entre avisos meteorológicos y activaciones de emergencia. El ámbito de estudio es el archipiélago canario, caracterizado por su elevada exposición a fenómenos meteorológicos adversos (episodios de lluvias intensas, viento, oleaje, calima o calor extremo) y por una elevada densidad poblacional en determinadas áreas (Dorta Antequera, 2007; Correa et al., 2025).

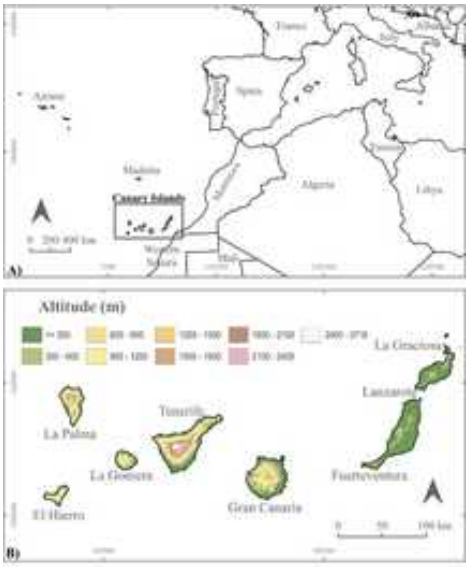


Figura 2. Localización geográfica y características topográficas de las Islas Canarias. (A) Localización de las Islas Canarias en la región del Atlántico Norte. (B) Distribución de la altitud por isla.

METODOLOGÍA

La investigación adopta un enfoque cuantitativo y descriptivo basado en la aplicación de un cuestionario estructurado distribuido de forma digital entre la comunidad universitaria de las dos universidades públicas canarias. La muestra final estuvo compuesta por 902 participantes, sobre una población potencial superior a 39.000 personas. El cuestionario se organizó en cuatro bloques: (i) conocimiento del sistema de avisos, (ii) comprensión de los mensajes, (iii) confianza institucional y (iv)comportamiento ante situaciones de alerta. Para el análisis de los datos se emplearon diferentes técnicas estadísticas. Por un lado, la correlación de Spearman se utilizó para analizar las relaciones entre variables ordinales, mientras que el test Chi-cuadrado permitió identificar asociaciones entre variables categóricas. Asimismo, la regresión logística multinomial se aplicó para determinar los factores explicativos de la percepción del riesgo y, por último, el análisis de conglomerados (K-means) se empleó para identificar distintos perfiles de comportamiento en la población encuestada.

RESULTADOS

El 73,9 % de los encuestados afirma conocer los niveles de aviso de la AEMET. Sin embargo, este conocimiento no se traduce en una comprensión completa del sistema, ya que solo el 41,4 % distingue entre un aviso meteorológico y una activación de Protección Civil. En términos de comportamiento, el 36,1 % de los participantes declara sentirse inseguro respecto a qué acciones debe adoptar tras recibir un aviso. Este dato refleja una importante limitación en la capacidad del sistema para generar respuestas efectivas. El análisis de conglomerados permitió identificar un grupo mayoritario denominado “informados pero confundidos” (43,8 %), que presenta conocimiento del sistema, pero inseguridad en la toma de decisiones. La principal causa de esta incertidumbre es la falta de claridad en las acciones recomendadas.

El análisis estadístico muestra además la existencia de relaciones significativas entre variables sociodemográficas y percepción del riesgo, especialmente en función de la edad, el nivel educativo y el grado de conocimiento del sistema de avisos.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos evidencian que el sistema de avisos meteorológicos funciona adecuadamente desde el punto de vista informativo, pero presenta limitaciones en su capacidad para generar comportamientos de autoprotección. La principal problemática identificada no es la falta de información, sino la dificultad para traducir esa información en acción ellos (Medina Morales & Máyer Suárez, 2025). En este sentido, la coexistencia de distintos sistemas de comunicación del riesgo con finalidades diferentes contribuye a generar confusión en la población. Se pone de manifiesto la existencia de una brecha entre conocimiento y acción, que limita la

efectividad de los sistemas de alerta temprana. Esta brecha está directamente relacionada con la falta de claridad en los mensajes y con la ausencia de indicaciones concretas sobre qué hacer ante cada situación. Por ello, se plantea la necesidad de evolucionar hacia modelos de comunicación más claros, coordinados y orientados a la acción, que incorporen recomendaciones explícitas y adaptadas a la población. En un contexto donde la mejora de los sistemas de alerta suele centrarse en la tecnificación, los resultados de este estudio subrayan la importancia de situar a la población en el centro del sistema, entendiendo que la efectividad de una alerta no depende únicamente de su emisión, sino de su comprensión y de su capacidad para generar respuesta.

REFERENCIAS

Bopp, E., & Douvinet, J. (2020). *Which type of Public Warning System should France adopt by 2021?* Cap'Alert Final Report (Avignon Université, ESPACE–CHROME–ATRISC). https://capalert.univ-avignon.fr/wp-content/uploads/sites/60/2020/12/Rapport-CHEMI-TERMINE_ENG_2.pdf Cap--MultiCan'Alert

Correa, J., López-Díez, A., Dorta, P. *et al.* Evolution of warm nights in the Canary Islands (1950–2023): evidence for climate change in the Southeastern North Atlantic. *Theor Appl Climatol* 156, 87 (2025). https://doi.org/10.1007/s00704-024-05290-1

Dorta Antequera, P. (2007). Catálogo de riesgos climáticos en Canarias: Amenazas y vulnerabilidad. Geographicalia, 51, 133–160.

McBride, S. K., DeGroot, R.-M., Sumy, D., Dent, L., & cols. (2023, diciembre). *Social Science and Education Research for ShakeAlert* [Resumen de congreso]. AGU Fall Meeting 2023. https://agu.confex.com/agu/fm23/meetingapp.cgi/Paper/1434804

Medina Morales, F., & Máyer Suárez, P. (2025)a. Percepción del sistema ES-Alert: un análisis exploratorio en la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. *Investigaciones Geográficas*, (84), 31–41. https://doi.org/10.14198/INGEO.29092

Potter, S. H., Kreft, P. V., Milojev, P., Noble, C., Montz, B., Dhellemmes, A., Woods, R. J., & Gauden-Ing, S. (2018). The influence of impact-based severe weather warnings on risk perceptions and intended protective actions. *International Journal of Disaster Risk Reduction, 30*(A), 34–43. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2018.03.031

Taylor, A. L., Kox, T., & Johnston, D. (2018). Communicating high impact weather: Improving warnings and decision making processes. *International Journal of Disaster Risk Reduction, 30*(Part A), 1–4. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2018.04.002

ENSEÑAR EL CAMBIO CLIMÁTICO: PERCEPCIONES Y ESTRATEGIAS DE LOS FUTUROS DOCENTES DE EDUCACIÓN PRIMARIA EN CANARIAS

Juan Samuel GARCÍA-HERNÁNDEZ[1], María Yazmina LOZANO MAS[2], María Inmaculada FERNÁNDEZ-ESTEBAN[2], Abel LÓPEZ-DÍEZ[3]

[1] Departamento de Didácticas Específicas, Universidad de La Laguna
[2] Departamento de Didácticas Específicas, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria
[3]Cátedra de Reducción del Riesgo de Desastres y Ciudades Resilientes y Grupo de Estudios en Ordenación Territorial y Riesgos (GEORIESGOS), Universidad de La Laguna (ULL), San Cristóbal de La Laguna, España.

jgarciah@ull.edu.es, yazmina.lozano@ulpgc.es, mesteban@ull.edu.es, alopezd@ull.edu.es

RESUMEN

La enseñanza de las ciencias sociales se encuentra en un proceso de renovación metodológica y conceptual desde comienzos del siglo XXI, que afecta a todos los niveles educativos. En este contexto, la Geografía afronta el reto de trasladar al aula contenidos propios de su práctica científica, esenciales para formar una ciudadanía crítica e informada. Este estudio analiza las percepciones del profesorado en formación de la Universidad de La Laguna sobre la integración del cambio climático en Educación Primaria y sus enfoques didácticos. Las respuestas a cuestionarios realizados en la asignatura de Didáctica de las Ciencias Sociales del Grado de Maestro/a en Educación Primaria permiten valorar el interés del futuro profesorado por esta temática, su percepción sobre la formación recibida y su grado de compromiso ante la emergencia climática. Asimismo, se analizan propuestas metodológicas para abordar causas, consecuencias y medidas de mitigación y adaptación. Los resultados muestran que el profesorado en formación reconoce la relevancia de esta temática en Primaria y demanda estrategias que superen la memorización y promuevan el análisis de la acción humana sobre el sistema climático. Se evidencia la necesidad de metodologías activas y significativas que sitúen al alumnado como protagonista en la búsqueda de soluciones y favorezcan el desarrollo de competencias críticas orientadas a la participación social y la toma de decisiones responsables.

Palabras clave: emergencia climática, formación del profesorado, currículo LOMLOE, Canarias.

ABSTRACT

The teaching of social sciences has undergone a process of methodological and conceptual renewal since the beginning of the 21st century, affecting all educational levels. In this context, Geography faces the challenge of bringing into the classroom content derived from its scientific practice, which is essential for fostering a critical and informed citizenship. This study analyzes the perceptions of pre-service teachers at the University of La Laguna regarding the integration of climate change into Primary Education and its didactic approaches. The responses to questionnaires conducted within the Social Sciences Didactics course of the Primary Education Teacher Training Degree allow for an assessment of future teachers' interest in this topic, their perception of the training received, and their level of commitment to the climate emergency. Likewise, methodological proposals addressing causes, consequences, and mitigation and adaptation measures are analyzed. The results show that pre-service teachers recognize the relevance of this topic in Primary Education and call for teaching strategies that go beyond memorization and promote the analysis of human impact on the climate system. They also highlight the need for active and meaningful methodologies that position students as key actors in the search for solutions and foster the development of critical competences aimed at social participation and responsible decision-making.

Key words: climate emergency, teacher training, LOMLOE curriculum, Canary Islands

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, el cambio climático se ha consolidado como uno de los principales desafíos ambientales, sociales y económicos del siglo XXI, con profundas implicaciones sobre los sistemas naturales y humanos. La evidencia científica ha demostrado su origen antrópico y carácter global, lo que ha impulsado la adopción de marcos internacionales de acción, como los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), así como políticas orientadas a la mitigación y adaptación (Correa et al., 2023). En este escenario, la educación adquiere un papel estratégico como instrumento clave para fomentar la conciencia ambiental, promover comportamientos sostenibles y capacitar a la ciudadanía ante la emergencia climática.

El sistema educativo, y en particular la enseñanza de las Ciencias Sociales y la Geografía, ocupa una posición privilegiada para abordar este fenómeno desde una perspectiva integradora que combine procesos físicos y dimensiones sociales, económicas y territoriales. No obstante, su incorporación en el ámbito escolar presenta dificultades derivadas de la complejidad del fenómeno y de la presencia de estereotipos y simplificaciones que dificultan su comprensión (Morote & Olcina, 2021). A ello se suma la persistencia de enfoques didácticos tradicionales basados en la memorización, que limitan el desarrollo del pensamiento crítico.

En el caso español, la reciente implantación del currículo derivado de la LOMLOE ha reforzado la presencia del cambio climático y la sostenibilidad como ejes transversales del proceso educativo, promoviendo la adquisición de competencias vinculadas al desarrollo sostenible, la responsabilidad ecosocial y la participación activa del alumnado. No obstante, la efectividad de estas orientaciones depende en gran medida de la formación del profesorado, especialmente en las etapas iniciales del sistema educativo. Tal y como señalan diferentes investigaciones, el nivel educativo constituye uno de los principales predictores de la conciencia sobre el cambio climático, lo que subraya la necesidad de garantizar una adecuada preparación docente en estos contenidos (Correa et al., 2023).

La formación inicial del profesorado adquiere una relevancia fundamental, ya que condiciona tanto el conocimiento conceptual sobre el cambio climático como las estrategias didácticas empleadas en el aula. Sin embargo, se ha evidenciado que en muchos casos resulta insuficiente, lo que puede derivar en una dependencia de manuales escolares y fuentes no siempre rigurosas. Esta situación es especialmente preocupante en Educación Primaria, etapa clave para la construcción de actitudes y competencias vinculadas a la sostenibilidad.

El presente trabajo analiza las percepciones del profesorado en formación de la Universidad de La Laguna sobre la enseñanza del cambio climático en Educación Primaria, valorando su interés, la formación recibida y las estrategias didácticas consideradas más adecuadas. Con ello, se pretende contribuir a la mejora de la formación docente y al desarrollo de propuestas educativas más rigurosas, críticas y orientadas a la acción.

METODOLOGÍA

El presente estudio adopta un enfoque predominantemente cuantitativo de carácter descriptivo, complementado con un análisis cualitativo de las respuestas abiertas, orientado a analizar las percepciones del profesorado en formación sobre la enseñanza del cambio climático en Educación Primaria. La investigación se desarrolla en el marco de la asignatura de Didáctica de las Ciencias Sociales del Grado en Maestro/a en Educación Primaria de la Universidad de La Laguna.

La muestra está compuesta por alumnado universitario en formación inicial docente, seleccionado mediante un muestreo no probabilístico e intencional, dada su adecuación a los objetivos del estudio como futuros profesionales responsables de abordar estos contenidos en el aula. En total, la población de referencia estuvo formada por 263 estudiantes, de los cuales se obtuvieron 155 respuestas válidas, lo que supone una tasa de respuesta del 58,9%. Este tamaño muestral permite trabajar con un nivel de confianza del 95% y un margen de error aproximado de ±5,5%, lo que

garantiza la fiabilidad de los resultados obtenidos.

Para la recogida de información se empleó un cuestionario estructurado, diseñado ad hoc, que combina preguntas cerradas y abiertas. Este instrumento se organiza en cuatro bloques: (1) interés y percepción sobre el cambio climático; (2) valoración de la formación recibida; (3) grado de compromiso ante la emergencia climática; y (4) estrategias y propuestas didácticas para su enseñanza en Educación Primaria.

La recogida de datos se realizó en el aula, garantizando la participación voluntaria y el anonimato del alumnado, tras la explicación previa de los objetivos del estudio. El análisis de los datos se llevó a cabo mediante un enfoque mixto. Por un lado, las preguntas cerradas se analizaron mediante estadística descriptiva (frecuencias y porcentajes). Por otro, las respuestas abiertas se sometieron a un análisis de contenido basado en la categorización temática, lo que permitió identificar patrones en relación con las estrategias didácticas propuestas y las percepciones del alumnado.

RESULTADOS

La muestra analizada está compuesta por 155 docentes en formación, mayoritariamente mujeres (74,2 %) y con edades comprendidas entre 16 y 20 años (82,6 %). En relación con el cambio climático, los resultados muestran un alto grado de sensibilidad e interés por esta temática. En una escala de 1 a 5, el interés por aprender sobre sus causas, consecuencias y soluciones alcanza una media de 4,43, de modo que el 92,3 % del alumnado se sitúa en los valores 4 o 5 (Figura 1). En la misma línea, la percepción sobre la relevancia de abordar el cambio climático en la geografía escolar es aún más elevada, con una media de 4,79; en este caso, el 96,8 % de las respuestas se concentra en los valores 4 o 5, y el 83,2 % selecciona directamente la opción máxima (Figura 1).

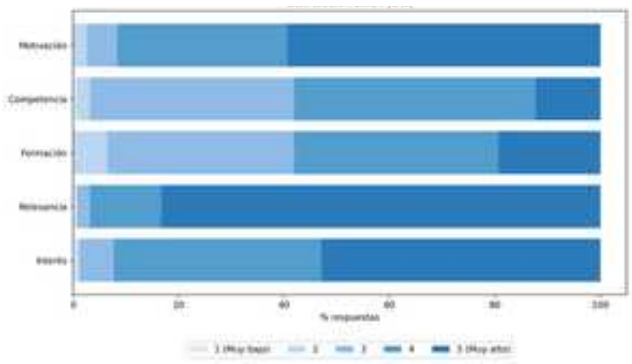


Figura 1. Distribución de las percepciones del alumnado sobre la enseñanza del cambio climático (escala Likert 1–5). Fuente: elaboración propia.

Sin embargo, esta alta valoración contrasta con una percepción más moderada de la formación recibida. La media obtenida en este ítem es de 3,71, con un predominio de valoraciones intermedias: el 35,5 % la considera “ni buena ni mala”, el 38,7 % “buena” y solo el 19,4 % “muy buena” (Figura 1). De forma similar, la competencia docente percibida para enseñar cambio climático presenta una media de 3,66. Aunque el 58,1 % del alumnado se sitúa en niveles 4 o 5, todavía un 38,7 % se ubica en el valor 3, lo que refleja cierta inseguridad a la hora de trasladar estos contenidos al aula.

Pese a ello, la motivación para incorporar actividades sobre cambio climático en la futura práctica docente es muy elevada. Este ítem alcanza una media de 4,48, con un 91,6 % de respuestas en los valores 4 o 5 y un 59,4 % en la opción máxima (Figura 1). En conjunto, los datos muestran un perfil de futuro profesorado altamente sensibilizado y dispuesto a trabajar esta temática, aunque con una preparación didáctica todavía mejorable.

Las respuestas abiertas refuerzan esta interpretación. En la valoración de la presencia del cambio climático en su formación, aparecen con frecuencia expresiones que apuntan a un tratamiento insuficiente, transversal o excesivamente teórico, junto a la demanda de un enfoque más práctico y aplicado. En cuanto a las metodologías recibidas, predominan las referencias a clases expositivas o teóricas (40,6 %), seguidas por actividades prácticas o vivenciales (36,8 %) y menciones al contexto cercano o problemas reales (37,4 %), aunque estas últimas aparecen de forma menos consolidada.

Por el contrario, cuando el alumnado plantea qué metodología utilizaría en su futura docencia, se observa una clara preferencia por enfoques activos. El 37,4 % menciona explícitamente el aprendizaje basado en proyectos o el trabajo por proyectos, el 36,8 % alude a actividades prácticas o vivenciales, y el 52,9 % subraya la importancia de partir del entorno cercano y de problemas reales. Además, solo un 9,7 % mantiene referencias a metodologías expositivas, lo que evidencia una apuesta clara por estrategias más participativas, contextualizadas y orientadas a la acción.

DISCUSIÓN

Los resultados evidencian un alto grado de sensibilización del profesorado en formación hacia el cambio climático, reflejado en elevados niveles de interés, relevancia percibida y motivación para su enseñanza en Educación Primaria. Este patrón es coherente con estudios recientes que destacan la creciente preocupación social ante este fenómeno, especialmente en contextos insulares como Canarias, caracterizados por una mayor vulnerabilidad (Correa et al., 2023; Dorta et al., 2018).

No obstante, esta predisposición contrasta con una valoración más moderada de la formación recibida y de la competencia docente percibida, lo que pone de manifiesto una brecha entre la conciencia ambiental y la preparación didáctica. Esta situación ha sido señalada en la literatura, que advierte sobre la insuficiente formación del profesorado y la persistencia de enfoques transmisivos basados en los manuales escolares (Morote & Olcina, 2021; Morote, 2020). En este sentido, estos resultados sugieren la existencia de una posible disociación entre la elevada sensibilización del alumnado y su preparación didáctica efectiva, lo que puede limitar la implementación real de propuestas educativas sobre cambio climático en el aula.

Asimismo, las respuestas del alumnado evidencian una crítica a las metodologías tradicionales, alineándose con estudios que señalan el predominio de actividades memorísticas en la enseñanza del clima en Primaria (Martínez & López, 2016). Frente a ello, se observa una clara preferencia por metodologías activas y basadas en problemas reales, en consonancia con enfoques didácticos orientados al desarrollo del pensamiento crítico y la comprensión de los problemas socioambientales (Pichastor & Rosaleñ, 2025).

CONCLUSIONES

El análisis realizado permite constatar que el cambio climático ocupa un lugar relevante en las preocupaciones y expectativas del profesorado en formación, que muestra una clara disposición a incorporarlo en su futura práctica docente. No obstante, esta actitud positiva convive con una percepción de formación insuficiente y con ciertas limitaciones en la autoconfianza para abordar estos contenidos en el aula, lo que pone de relieve la necesidad de reforzar la formación inicial en este ámbito. Asimismo, se observa una preferencia generalizada por metodologías activas, vinculadas al entorno cercano y a problemas reales, frente a enfoques tradicionales de carácter transmisivo. En consecuencia, se hace necesario avanzar hacia modelos formativos que integren de manera efectiva contenidos científicos actualizados y estrategias didácticas innovadoras, contribuyendo así al desarrollo de una educación climática más crítica, significativa y orientada a la acción en Educación Primaria.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento al alumnado de 2.º curso del Grado en Educación Primaria (Curso 2025-2026) por su participación en el estudio, así como por su implicación y disposición durante el proceso de recogida de información.

REFERENCIAS

Correa, J., López-Díez, A., Dorta, P., & Martín, N. (2023). La percepción del cambio climático en espacios insulares: el caso de Tenerife. (2023). *Boletín De La Asociación De Geógrafos Españoles, 96*. https://doi.org/10.21138/bage.3342

Dorta, P., López-Díez, A., & Díaz-Pacheco, J. (2018). El calentamiento global en el Atlántico Norte Suroriental. El caso de Canarias. Estado de la cuestión y perspectivas de futuro. *Cuadernos Geográficos, 57*(2), 27-52. https://doi.org/10.30827/cuadgeo.v57i2.5934

Martínez, R., & López, J.A. (2016). La enseñanza de la climatología en los manuales escolares de Ciencias Sociales en Educación Primaria. En R. Sebastiá y E. Tonda (Eds.), *La investigación e innovación en la enseñanza de la Geografía* (pp. 245-258). San Vicente del Raspeig, España: Servicio de Publicaciones de la Universidad de Alicante.

Morote, A.F. (2020). ¿Cómo se trata el tiempo atmosférico y el clima en la Educación Primaria? Una exploración a partir de los recursos y actividades de los manuales escolares de Ciencias Sociales. *Espac. Tiempo Forma Ser. VI Geogr, 13*, 247-272. http://dx.doi.org/10.5944/etfvi.13.2020

Morote A.F., & Olcina, J. (2021). La importancia de la enseñanza del cambio climático. Propuestas didácticas para la Geografía escolar. *Estudios Geográficos, 82*(291), 1-18. https://doi.org/10.3989/estgeogr.202189.089

Pichastor, M. B., & Rosaleñ, R. C. (2025). Metodologías activas, sostenibilidad y objetivos de desarrollo sostenible. Etic@ net. *Revista científica electrónica de Educación y Comunicación en la Sociedad del Conocimiento, 25*(1), 158-184. https://doi.org/10.30827/eticanet.v25i1.32696

PATRONES DE COMPORTAMIENTO ESTATAL EN GOBERNANZA CLIMÁTICA INTERNACIONAL Y SU AFECTACIÓN A LA BIODIVERSIDAD: UN ACERCAMIENTO DESDE LA COMUNICACIÓN POLÍTICA, LA EDUCACIÓN AMBIENTAL Y LA GEOPOLÍTICA.

Aarón CHAVES CARRILLO[1], María CAMPOS ZUÑIGA[2]

[1] *Universidad Nacional de Costa Rica, Facultad de Ciencias Sociales, Escuela de Relaciones Internacionales*
[2] *Universidad Nacional de Costa Rica, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Escuela de Biología*

aaron.chaves.carrillo@est.una.ac.cr, maria.campos.zuniga@est.una.ac.cr

RESUMEN

El presente trabajo analiza los patrones de comportamiento estatal en la gobernanza climática y su impacto en los daños ambientales, incorporando a su vez como eje temático principal el nivel de reconocimiento institucional que se le da al saber científico sobre el daño ambiental y el cambio climático. Se plantea como hipótesis que cuando la evidencia científica no es correctamente incorporada y deslegitimada en las decisiones estatales, hay un aumento en las probabilidades de decisiones que no ven como prioridad la protección ambiental, lo que se relaciona directamente con consecuencias como la deforestación, la pérdida de especies y la degradación de ecosistemas. Desde el ámbito político se analizan comportamientos estatales, los cuales adoptan discursos que restan prioridad al impacto ambiental, dichas acciones generan una politización del ambiente y disputas que cuestionan la validez del conocimiento científico. En el plano ambiental, se analizan indicadores como la pérdida de cobertura forestal, la degradación ecológica y la pérdida de especies. Estas consecuencias se vinculan con patrones de comportamiento estatal. Metodológicamente, la investigación se basó en un enfoque comparativo de carácter cualitativo, principalmente en periodos asociados a cambios políticos relevantes, mediante un análisis de discursos y documentos oficiales que sustentan decisiones con impacto ambiental. El estudio se apoya en datos satelitales y registros oficiales de deforestación y biodiversidad provenientes de plataformas como Global Forest Watch, PRODES, FAO, reportes a la CMNUCC y la World Database on Protected Areas. Se analizan los casos de Brasil, Estados Unidos e Indonesia, con Costa Rica como contraste institucional, en el periodo 1999–2026.

Palabras clave: gobernanza climática, patrones de comportamiento estatal, reconocimiento científico, politización del ambiente, biodiversidad y geopolítica ambiental.

ABSTRACT

This study analyzes patterns of state behavior in climate governance and their impact on environmental degradation, taking as its central focus the degree of institutional recognition granted to scientific knowledge on environmental damage and climate change. It hypothesizes that when scientific evidence is inadequately incorporated or actively delegitimized in state decision-making, the likelihood increases of policies that do not prioritize environmental protection, which are directly associated with outcomes such as deforestation, species loss, and ecosystem degradation. From a political perspective, the study examines state behaviors that adopt narratives minimizing the importance of environmental impacts, thereby fostering the politicization of environmental issues and generating disputes that challenge the validity of scientific knowledge. From an environmental standpoint, the analysis focuses on indicators such as forest cover loss, ecological degradation, and species decline, linking these outcomes to specific patterns of state behavior. Methodologically, the research is based on a qualitative comparative approach, primarily centered on periods associated with significant political changes, through the analysis of official discourses and documents that underpin environmentally impactful decisions. The study draws on satellite data and official records of deforestation and biodiversity from sources such as Global Forest Watch, PRODES, FAO, reports to the UNFCCC, and the World Database on Protected Areas. The cases of Brazil, the United States, and Indonesia are examined, with Costa Rica serving as an institutional contrast, covering the period 1999–2026.

Keywords: climate governance, state behavior patterns, scientific recognition, environmental politicization, biodiversity, environmental geopolitics.

INTRODUCCIÓN

La gobernanza climática es posible entenderla como la articulación de instituciones, decisiones, normas y prácticas principalmente provenientes de los Estados y otros actores que dirigen diversas acciones políticas frente a la crisis climática. El estudio de la gobernanza climática resulta un eje central en la presente investigación porque la capacidad de respuesta ambiental no es exclusiva y dependiente de la existencia de acuerdos internacionales, sino que también debe depender en la medida en que cada Estado incorpora, interpreta o deslegitima el conocimiento científico en su acción pública. A su vez, se evidencia que cada Estado adapta su agenda a sus prioridades políticas e institucionales de gobernanza climática. Siguiendo este marco conceptual, es necesario definir patrones de comportamiento estatal como configuraciones sistemáticas y estructurales pertenecientes al accionar político que implementan diversos discursos oficiales, decisiones institucionales y una integración de las políticas públicas.

Estos patrones facilitan la observación de los Estados y su interés en priorizar su agenda productiva, antes que la conservación ambiental. Es importante recalcar que, dependiendo de la polaridad política, estos comportamientos pueden expresarse en dos direcciones opuestas: cuando existe reconocimiento de la evidencia científica, la acción estatal tiende a dirigirse y evidentemente fortalecer la regulación ambiental; pero cuando esa evidencia científicamente es deslegitimada, la política pública tiende a favorecer agendas productivistas o extractivas con efectos negativos sobre los ecosistemas, habiendo advertencias previas del daño colateral al ambiente.

La relación entre crisis climática y los patrones de comportamiento estatal ha sido abordada de forma fragmentada y diversa en la literatura. Algunos estudios se concentran en la arquitectura institucional de la gobernanza climática, como entidades reguladoras y promotoras del cuidado ambiental, tratados y otros mecanismos, por otro lado, la literatura ha analizado discursos políticos o impactos ecológicos sin asociar de forma directa entre ambos niveles. Esa separación de la literatura ha limitado una comprensión integral del problema que se presenta en la investigación. Por esta misma razón, este estudio articula Relaciones Internacionales y Biología para abordar, de forma comparada, el poder político, la legitimidad científica y la incidencia de las decisiones estatales sobre la biodiversidad y los sistemas ecológicos. El estudio se orienta a evidenciar en qué medida el grado de reconocimiento institucional del conocimiento científico puede incidir en las decisiones estatales y sus repercusiones ambientales. Para lograr esta asociación, se seleccionan Brasil, Estados Unidos e Indonesia como casos de politización climática con trayectorias distintas, y a Costa Rica como un caso de contraste institucional, con la finalidad de identificar patrones comparables entre orientación política, acción estatal y sus resultados ecológicos en la biodiversidad (Bulkeley et al., 2014; Aykut & Maertens, 2021).

METODOLOGÍA

El presente trabajo de investigación consistió en un diseño comparativo de carácter cualitativo, complementado con evidencia ambiental descriptiva. Se utilizaron diferentes artículos científicos, reportes institucionales y bases de datos internacionales, entre ellas FAO, Global Forest Watch, INPE, UNFCCC, IPBES, UNEP-WCMC y World Bank. El trabajo de investigación se basó en el análisis basado en estudios de casos específicos y organizados en períodos previos y posteriores a cambios políticos de suma relevancia para el sistema internacional, con la finalidad de relacionar las variaciones en los patrones de comportamiento estatal. Esta estructura metodológica permitió construir asociaciones entre decisiones gubernamentales, discursos oficiales y efectos ecológicos observables, guiándose en la revisión sistemática de referencias académicas y documentos oficiales.

En el contexto ambiental, se realizó el análisis mediante indicadores ecológicos medibles, lo que permitió un monitoreo verificable entre países y a lo largo del tiempo (Global Forest Watch, 2023). Para la variable de deforestación, se utilizaron registros satelitales provenientes de Global Forest Watch y del sistema PRODES del Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), los cuales permitieron medir pérdida de cobertura forestal y alertas de deforestación. En el caso de la degradación ecológica, se emplearon reportes de la Food and Agriculture Organization (FAO, 2020) y evaluaciones ecosistémicas de IPBES (2019), orientadas al análisis de alteraciones en funciones ecológicas y presión sobre ecosistemas. Respecto a la pérdida de biodiversidad, se utilizaron datos de UNEP-WCMC (2023), Protected Planet y diversos estudios científicos especializados sobre disminución poblacional y fragmentación de hábitats en especies vulnerables.

Los Estados escogidos y debidamente analizados se sometieron a un análisis comparativo. En el caso de Brasil, se seleccionan los mandatos de presidencia de Lula Da Silva (2003-2006) y (2007-2010), a Dilma Roussef (2011-2014) y (2015-2016) y Jair Bolsonaro (2019-2022) por razones de diferenciar las políticas públicas de los 3 presidentes en Brasil, el mismo se incluyó por la relevancia ecológica de la Amazonía a nivel mundial, la regulación climática y la biodiversidad. En el caso de Estados Unidos se selecciona a partir de la administración de Donald Trump (2017–2021 y Joe Biden (2021–2025), por el contexto de politización climática, que es posible evidenciarlo en el cuestionamiento sostenido al consenso científico y la política ambiental (McCright & Dunlap, 2011; Dunlap et al., 2016). También se escogió Indonesia porque mostró una gobernanza climática tensionada, considerando la administración de Joko Widodo (2014–2024). A lo largo de la investigación se hizo notorio la fuerte dependencia estructural de sectores extractivos, especialmente la expansión del aceite de palma y la explotación forestal (Moeliono et al., 2020; Hermawan et al., 2023; Cisneros et al., 2021). El caso contraste fue Costa Rica incluyendo el periodo de Rodrigo Chaves Robles (2022–2026) porque se ha caracterizado por políticas de descarbonización y programas nacionales de carbono neutral, enmarcados en indicadores de gobernanza como los Worldwide Governance Indicators del Banco Mundial (World Bank, 2021). Esta comparación se articuló a partir de gobiernos con orientaciones políticas contrastantes y distinto grado de incorporación del conocimiento científico en la política pública, logrando que cada Estado tuviese un contexto diferente política y ambientalmente.

En el contexto ambiental, se hizo el análisis basándose en diversos indicadores ecológicos medibles, esto facilitó un monitoreo verificable entre países y a lo largo del tiempo (Global Forest Watch, 2023). En la investigación se incorporaron tres variables principales: la deforestación, la cual se puede entender como la transformación de bosques hacia otros usos del suelo con pérdida de cobertura arbórea; la degradación ecológica, la cual se conceptualiza como la reducción de la capacidad de los

ecosistemas para mantener sus funciones y servicios (FAO, 2020); y la pérdida de biodiversidad, la misma es asociable al desplazamiento y disminución de especies como consecuencia de la degradación ambiental (UNEP-WCMC, 2023). Estas variables incorporadas, al ser comparables y verificables, lograron permitir las asociaciones entre patrones de comportamiento estatal y consecuencias ambientales de dichas decisiones.

RESULTADOS

Especialmente en el caso de Brasil, durante la administración presidencial de Jair Bolsonaro (2019–2022), se produjo una inclinación política adversa a la agenda climática presentada internacionalmente, también esta administración de Bolsonaro se alineó con la expansión de intereses productivos en la Amazonía, lo que orientó diferentes ejes institucionales de la política ambiental. Esta posición de Bolsonaro se vio traducida en decisiones estatales y concretas las cuales se orientaron en recortes presupuestarios cercanos al 25% en el Ministerio de Medio Ambiente. Se hizo evidente la debilidad operativa que tenían las agencias de fiscalización como IBAMA (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis) y la aproximada reducción del 22% en la imposición de sanciones por infracciones ambientales (Louault, 2020). En conjunto, se creó una confrontación directa con instituciones científicas como el INPE (Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales), la cual cargaba con la deslegitimación pública por parte del Poder Ejecutivo brasileño de sus datos y esto facilitó una ruptura entre evidencia científica y toma de decisiones por parte del Estado. Bajo este lineamiento, los datos expuestos al INPE mostraron un notorio aumento de la deforestación: entre el periodo de agosto de 2018 y julio de 2019 se deforestó aproximadamente 9,762 km² de bosque, por lo que representa en un aumento del 29.5% respecto del periodo anterior. Este auge que tuvo la deforestación fue acompañado de un crecimiento de 90.3% en las alertas de deforestación en tiempo real, así como de un aumento del 274% en los incendios forestales en el mes de julio de 2019 en comparación con el año previo (INPE, 2022; Louault, 2020).

Por otro lado, en los gobiernos brasileños de Luiz Inácio Lula da Silva (2003–2010) y, con la continuidad de la presidenta Dilma Rousseff (2011–2016), la acción estatal se articuló girando en torno al fortalecimiento institucional y a la incorporación sistemática del conocimiento científico en la política pública. Todo esto fue posible mediante la capacidad de instrumentos como el PPCDAm (Plan de Acción para la Prevención y Control de la Deforestación en la Amazonía), basado en monitoreo satelital, una fiscalización territorial y una expansión de áreas protegidas, lo que produjo una mayor y fortalecida articulación entre capacidades estatales y evidencia técnica. Este proceso es posible entenderlo gracias a una organización dirigida de la política pública hacia la legitimidad del saber científico y en una gobernanza ambiental más

sostenible. Bajo este mismo contexto, la deforestación en la Amazonía se redujo abruptamente de 27,700 km² en 2004 a alrededor de 4,600 km² en 2012, uno de los descensos más significativos de la región amazónica (Nepstad et al., 2014; Global Forest Watch, 2023). Estas medidas tomadas desde el Poder Ejecutivo lograron evidenciar que el monitoreo satelital de la Amazonía, la expansión de áreas protegidas y la intervención estatal permiten integrar el conocimiento científico en la toma de decisiones institucionales y mejorar de forma medible y clara la conservación de la biodiversidad en una zona tan relevante ambientalmente.

En el caso de los Estados Unidos, durante el primer mandato de Donald Trump (2017–2021), la política ambiental estadounidense tuvo una orientación dirigida hacia la despriorización, en otras palabras, la gobernanza climática no era de interés estatal. Este enfoque mantenido por Donald Trump se materializó en el retiro del Acuerdo de París, también en decisiones nacionales como lo fue la reversión de más de un centenar de regulaciones ambientales, federales y un fuerte debilitamiento de agencias clave como la Environmental Protection Agency (EPA), lo que hizo evidente la ruptura entre evidencia científica y acción estatal y un rechazo por parte de Estados Unidos para alinear su agenda estatal al sentido de sostener compromisos climáticos (Popovich et al., 2020). En el contexto ecológico, estas decisiones tomadas por el Poder Ejecutivo estadounidense lograron incrementar presiones ejercidas sobre los ecosistemas más vulnerables, a través del extractivismo y la alteración de hábitats críticos. Para hacer evidente este ejemplo, se utiliza al caribú ártico (Rangifer tarandus), para ilustrar este punto, es una especie dependiente de áreas continuas y poco perturbadas, las decisiones políticas adoptadas afectaron su territorio y la creciente exposición a infraestructura altera sus rutas migratorias y limita éxito reproductivo, esto genera efectos adversos al mantenimiento de la especie (IPBES, 2019). En contraste, en la administración de Joe Biden (2021–2025) fue posible observar una diferente acción política estadounidense. Fue clara la diferencia en el accionar político frente al cambio climático; Joe Biden hizo posible la reincorporación de Estados Unidos al Acuerdo de París, también el fortalecimiento institucional en vigilancia del cuidado ambiental y una clara implementación de instrumentos de gran escala como el Inflation Reduction Act, instrumento orientado a la transición energética y una reducción de emisiones de carbono. Este giro en la política de Estados Unidos se vio reflejado en una mayor alineación entre política pública y conocimiento científico, fortaleciendo la capacidad estatal de intervenir en la problemática climática. Estas medidas contribuyeron a mitigar la presión sobre los ecosistemas que fueron afectados en la administración de Donald Trump. Esto se logró mediante la reducción de emisiones y un mejor uso de energías limpias, lo que favoreció indirectamente la estabilidad de hábitats y una mejor conservación de especies vulnerables frente a la variación de temperatura y la pérdida de cobertura natural.

Por otro lado, en Indonesia, este se presenta como un caso de tensión político-estructural, donde la política ambiental y la preservación de ecosistemas fue dependiente y condicionada por el mercado de sectores extractivos, que es uno de los negocios principales de Indonesia. En la administración de Joko Widodo (2014–2024), el gobierno de Indonesia logró implementar diversas moratorias parciales sobre nuevas plantaciones y concesiones forestales; no obstante, este alcance fue rápidamente limitado y reducida su capacidad operacional por las presiones económicas que ejercían al negocio del aceite de palma y a la expansión de la agroindustria, ya que, estos sectores tiene una alta capacidad de influencia sobre la política pública de Indonesia (Austin et al., 2019; Cisneros et al., 2021). Consecuentemente, en el periodo del 2001 al 2019, Indonesia perdió alrededor de 24 millones de hectáreas de cobertura forestal, esto es posible asociarlo principalmente a la industria del aceite de palma, la misma que es predominante en dicho Estado (Global Forest Watch, 2023). En el plano ambiental, este proceso ha generado efectos devastadores sobre especies como el orangután de Borneo (Pongo pygmaeus), cuyas poblaciones disminuyeron en 100,000 individuos entre los periodos de 1999 y 2015 debido al desplazamiento por pérdida de hábitat, también la deforestación y daño ecológico (Voigt et al., 2018). A todo esto, se suma el impacto sobre otras especies emblemáticas, como el tigre de Sumatra (Panthera tigris sumatrae), el elefante de Sumatra (Elephas maximus sumatranus) y el rinoceronte de Sumatra (Dicerorhinus sumatrensis). Estas especies y sus poblaciones han sido fuertemente afectadas por la conversión de bosques en plantaciones agrícolas, zonas de explotación natural y la fragmentación de sus hábitats.

Por otro lado, el caso contraste es Costa Rica, este modelo de gobernanza ambiental está caracterizado internacionalmente por el respeto institucional, una incorporación en el plano estatal del conocimiento científico y un accionar político sostenido hacia la conservación y la sostenibilidad. Desde finales del siglo XX, el Estado de Costa Rica, ha implementado políticas públicas robustas, que han tenido efectos positivos, como es el caso del Programa de Pago por Servicios Ambientales (Sistema Nacional de Áreas de Conservación, 2020). Esto ha permitido articular sostenibilidad y política pública de manera continua. Esta articulación entre evidencia científica y capacidad estatal, hace que se favorezca la reversión de procesos de deforestación y de igual forma la consolidación de una política ambiental consistente y sostenible a nivel estatal (Food and Agriculture Organization, 2020). También la prohibición de la caza deportiva, las regulaciones para evitar la domesticación de fauna silvestre y la expansión del sistema de áreas protegidas, en otras palabras, lo que Costa Rica considera bosque que debe ser protegido e inviolable, han contribuido a la protección de especies vulnerables y al mantenimiento del equilibrio trófico dentro de los ecosistemas tropicales. Siguiendo la línea del caso costarricense, esta arquitectura institucional ha favorecido la protección de la biodiversidad y ecosistemas claves, lo cual ha producido impactos medibles en la estabilidad de los ecosistemas. Un ejemplo

de ello es la recuperación de especies emblemáticas como el jaguar *(Panthera onca)* y el tapir (*Tapirus bairdii)*, especies que han sido dependientes de hábitats continuos y protegidos. Las multas y penalizaciones que aplica el Estado costarricense por tráfico y posesión de fauna silvestre también han contribuido a reducir la presión ejercida sobre la biodiversidad. No obstante, en años recientes han surgido diversos debates y cuestionamientos políticos durante la administración de Rodrigo Chaves Robles (2022-2026), pero el modelo ambiental costarricense no se ha desmantelado y sigue vigente; aunque enfrenta tensiones que pueden afectar las políticas clave que han hecho que se preserve los ecosistemas.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los resultados del presente trabajo de investigación logran evidenciar que los patrones de comportamiento estatal no están limitados solamente a variaciones discursivas, sino que operan como diversos mecanismos concretos que orientan la gobernanza climática y producen efectos verificables en temas ambientales. Especialmente en los casos de Jair Bolsonaro y Donald Trump, la deslegitimación que estos líderes políticos ejercían y ejercen del conocimiento científico se vio traducido en una serie de decisiones estatales: ambos gobiernos tensionaron o abandonaron el Acuerdo de París, lograron priorizar agendas productivistas e ignoraron advertencias científicas sobre el daño climático, debilitaron internamente las agencias ambientales y la capacidad estatal de sostener políticas climáticas consistentes. En el caso de Brasil, se notó explícito en el desmantelamiento de la fiscalización ambiental, la confrontación con instituciones científicas que Bolsonaro protagonizó como el INPE y el aumento de la deforestación amazónica. Lo mismo ocurre en el caso de Estados Unidos, viéndose reflejado en el retiro formal del Acuerdo de París y una reversión de un amplio conjunto de regulaciones ambientales y federales (Louault, 2020; Popovich et al., 2020; INPE, 2022). En ambos casos estatales, el daño ambiental no constituye un efecto colateral de la actividad económica o un avance de la producción, sino una consecuencia institucionalmente directa e inducida por decisiones estatales que reducen el peso de la evidencia científica en la formulación de políticas públicas y limitan la capacidad que la ciencia tiene de intervenir en decisiones ambientales claves.

La gravedad de estos procesos políticos radica en que alteran y condicionan la posibilidad para una gobernanza ambiental efectiva y retroceden en políticas de conservación ambiental, como fue el caso de Brasil y Estados Unidos, que tenían agencias que velaban por el cuidado ambiental, pero al ser obstrucción de la agenda estatal, decidieron desfinanciarlas o limitarles la capacidad operativa. De igual manera, la pérdida de cobertura forestal, la fragmentación de hábitats y la afectación de especies clave muestran que la deslegitimación del conocimiento científico no solo debilita y reduce la calidad de la política climática, se evidencia que también

incrementa la vulnerabilidad y se visibiliza la fragilidad que tienen los ecosistemas, cuya recuperación puede ser lenta, parcial o incluso irreversible ante daños extremos. En contraste, Costa Rica demuestra que como Estado, sí puede existir continuidad institucional, el respeto por la evidencia científica y políticas públicas que se orienten a la conservación, también unas respuestas estatales que puedan sostener trayectorias más estables y protectoras de la biodiversidad.

A raíz de esta comparación, Indonesia y Costa Rica permiten concluir la discusión desde diversas configuraciones político-institucionales que se contrastan entre ellas, por un lado, Indonesia evidencia que la presión de intereses económicos sobre los sectores extractivos condiciona y limita en cierto grado la implementación efectiva de la política ambiental, disminuye la intervención del Estado, eficacia de acuerdos internacionales y a su vez, genera una brecha persistente entre los compromisos formales y resultados ecológicos. Finalmente, el presente estudio confirma que los impactos ambientales no solamente son resultados accidentales, sino que se puede analizar como consecuencias estructurales de decisiones políticas basadas en el grado de legitimidad otorgado al conocimiento científico. De esta forma posiciona a la dimensión epistemológica como un elemento central para comprender y mejorar la efectividad de la gobernanza climática.

REFERENCIAS

Austin, K. G., Schwantes, A., Gu, Y., & Kasibhatla, P. S. (2019). *What causes deforestation in Indonesia?* Environmental Research Letters, 14(2). https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaf6db

Cisneros, E., Kis-Katos, K., & Nuryartono, N. (2021). *Palm oil and deforestation in Indonesia.* Ecological Economics, 186, 107056. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2021.107056

Dunlap, R. E., McCright, A. M., & Yarosh, J. H. (2016). *The political divide on climate change.* Environment: Science and Policy for Sustainable Development, 58(5), 4–23. https://doi.org/10.1080/00139157.2016.1208995

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2020). *Global Forest Resources Assessment 2020: Main report.* https://doi.org/10.4060/ca9825en

Global Forest Watch. (2023). *Global Forest Watch data and methodology.* World Resources Institute. https://www.globalforestwatch.org/

Hermawan, A., Nurrochmat, D. R., Sundawati, L., & Ekayani, M. (2023). *Forest and land governance in Indonesia: Institutional challenges and environmental policy dynamics.* Forest Policy and Economics, 152, 102998. https://doi.org/10.1016/j.forpol.2023.102998

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. (2022). *Monitoramento da Floresta Amazônica Brasileira.*

Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. (2019). *Global assessment report on biodiversity and ecosystem services.* https://ipbes.net/global-assessment

Louault, F. (2020). *La política ambiental del gobierno Bolsonaro.* En O. Dabène (Ed.), *América Latina. El año político 2019* (pp. 16–24). Les Études du CERI. https://hal.science/hal-03471284

McCright, A. M., & Dunlap, R. E. (2011). *The politicization of climate change.* Sociological Quarterly, 52(2), 155–194. https://doi.org/10.1111/j.1533-8525.2011.01198.x

Moeliono, M., Gallemore, C., Santoso, L., Brockhaus, M., & Di Gregorio, M. (2020). *Information networks and power: Confronting the "wicked problem" of Indonesia's oil palm expansion.* Global Environmental Change, 61, 102029. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2020.102029

Nepstad, D., McGrath, D., Stickler, C., Alencar, A., Azevedo, A., Swette, B., Bezerra, T., DiGiano, M., Shimada, J., da Motta, R. S., Armijo, E., Castello, L., Brando, P., Hansen, M. C., McGrath-Horn, M., Carvalho, O., & Hess, L. (2014). *Slowing Amazon deforestation through public policy and interventions.* Science, 344(6188), 1118–1123. https://doi.org/10.1126/science.1248525

Popovich, N., Albeck-Ripka, L., & Pierre-Louis, K. (2020). *The Trump administration rolled back more than 100 environmental rules.* The New York Times. https://www.nytimes.com/interactive/2020/climate/trump-environment-rollbacks.html

Sistema Nacional de Áreas de Conservación. (2020). *Áreas protegidas de Costa Rica.* https://www.sinac.go.cr/

United Nations Framework Convention on Climate Change. (2015). *The Paris Agreement.* https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement

UNEP-WCMC. (2023). *Protected Planet Report 2023.* https://www.protectedplanet.net/

Voigt, M., Wich, S. A., Ancrenaz, M., Meijaard, E., Abram, N., Banes, G. L., Campbell-Smith, G., D'Arcy, L. J., Delgado, R. A., Erman, A., Gaveau, D., Goossens, B., Husson, S., Leighton, M., Loken, B., Love, E., Nater, A., Simorangkir, T., Singleton, I., & Kühl, H. S. (2018). *Global demand for natural resources eliminated more than 100,000 Bornean orangutans.* Current Biology, 28(5), 761–769.e5. https://doi.org/10.1016/j.cub.2018.01.053

World Bank. (2021). *Worldwide Governance Indicators.* https://info.worldbank.org/governance/wgi/

METODOLOGÍAS ACTIVAS PARA LA ENSEÑANZA DE LA SOSTENIBILIDAD Y EL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA FORMACIÓN INICIAL DEL PROFESORADO DE EDUCACIÓN PRIMARIA

Abel LÓPEZ-DÍEZ[1], Nerea MARTÍN-RAYA[1] y Jordan CORREA[1]

[1] Cátedra de Reducción del Riesgo de Desastres y Ciudades Resilientes y Grupo de Estudios en Ordenación Territorial y Riesgos (GEORIESGOS), Universidad de La Laguna (ULL), San Cristóbal de La Laguna, España

alopezd@ull.edu.es, nmartinr@ull.edu.es, jcorreag@ull.edu.es

RESUMEN

La educación en sostenibilidad y cambio climático constituye un eje clave del currículo de Educación Primaria, orientado a formar una ciudadanía crítica y comprometida con los desafíos ambientales actuales; en este sentido, la formación inicial del profesorado debe integrar no solo conocimientos científicos, sino también metodologías activas que faciliten su aplicación didáctica en el aula. En este marco, se desarrolla una experiencia de innovación docente en la asignatura Geografía del Mundo Actual del Grado en Maestro/a en Educación Primaria de la Universidad de La Laguna durante los cursos académicos 2024-2025 y 2025-2026, basada en enfoques colaborativos y situaciones de aprendizaje aplicadas. La propuesta se estructura en tres prácticas: (1) la elaboración e interpretación de climogramas para comprender la diversidad climática y su didáctica (2) el análisis de los Espacios Naturales Protegidos de Canarias como recurso para la educación ambiental; y (3) el diseño de materiales didácticos sobre cambio climático, abordando causas, impactos y medidas de mitigación y adaptación, junto con la reflexión sobre el papel docente. La experiencia fue evaluada mediante un cuestionario realizado a 162 estudiantes, con 99 respuestas válidas (61,1% del total), alcanzando un nivel de confianza del 95% y un margen de error de ±6,2%. Los resultados evidencian una valoración muy positiva, con un grado de satisfacción valorado en casi 6 puntos sobre 7 y más del 90% del alumnado satisfecho con su aprendizaje, destacando su utilidad para la futura práctica docente.

Palabras clave: innovación docente, aprendizaje colaborativo, recursos didácticos, acción ambiental.

ABSTRACT

Sustainability and climate change education constitutes a key axis of the Primary Education curriculum, aimed at fostering a critical and committed citizenry in the face of current environmental challenges; in this sense, initial teacher training must integrate not only scientific knowledge but also active methodologies that facilitate its didactic application in the classroom. Within this framework, a teaching innovation experience was developed in the course Geography of the Contemporary World of the Primary Education Degree at the University of La Laguna during the 2024–2025 and 2025–2026 academic years, based on collaborative approaches and applied learning situations. The proposal is structured around three activities: (1) the creation and interpretation of climographs to understand climate diversity and its didactics; (2) the analysis of the Protected Natural Areas of the Canary Islands as a resource for environmental education; and (3) the design of teaching materials on climate change, addressing causes, impacts, and mitigation and adaptation measures, together with reflection on the role of the teacher. The experience was evaluated through a questionnaire administered to 162 students, with 99 valid responses (61.1% of the total), achieving a 95% confidence level and a margin of error of ±6.2%. The results show a very positive assessment, with a satisfaction level rated at nearly 6 out of 7 and more than 90% of students satisfied with their learning, highlighting its usefulness for future teaching practice.

Key words: Teaching innovation, collaborative learning, teaching resources, environmental action.

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, el cambio climático y la sostenibilidad han pasado de ser contenidos complementarios a constituir ejes fundamentales dentro de los sistemas educativos, en consonancia con los desafíos ambientales, sociales y económicos que caracterizan el contexto actual. En este escenario, la Educación Primaria se configura como una etapa clave para el desarrollo de una ciudadanía crítica y comprometida, capaz de comprender la complejidad de estos procesos y de participar activamente en la búsqueda de soluciones. Sin embargo, la incorporación efectiva de estos contenidos en el aula continúa presentando importantes limitaciones, especialmente en lo que respecta a su tratamiento didáctico y a la formación del profesorado encargado de abordarlos.

Diversos trabajos han señalado que la enseñanza del clima y del cambio climático en los niveles obligatorios sigue estando condicionada por enfoques tradicionales, centrados en la transmisión de contenidos y con escasa conexión con la realidad del alumnado. En este sentido, el análisis de los manuales escolares pone de manifiesto la persistencia de un tratamiento fragmentado y, en ocasiones, superficial de estos

temas (Martínez y López, 2016; Morote, 2020), lo que dificulta no solo su comprensión por parte del estudiantado, sino también la construcción de una conciencia ambiental sólida en el mismo. A ello se suma la necesidad de integrar perspectivas que vayan más allá del conocimiento teórico, incorporando dimensiones actitudinales y competenciales que permitan al alumnado interpretar su entorno y actuar de manera responsable ante los retos que plantea el cambio climático.

Frente a estas limitaciones, la literatura reciente subraya el potencial de las metodologías activas y colaborativas para favorecer un aprendizaje más significativo, contextualizado y orientado a la acción. Estas aproximaciones didácticas no solo facilitan la adquisición de conocimientos, sino que también promueven el desarrollo de habilidades críticas y un firme compromiso con la sostenibilidad y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (Pichastor y Rosaleñ, 2025). En este marco, resulta especialmente relevante considerar el contexto territorial en el que se desarrollan los procesos educativos. En regiones insulares como Canarias, caracterizadas por su alta vulnerabilidad frente a los efectos del cambio climático, la educación adquiere un papel estratégico, tanto en la comprensión de los fenómenos como en la promoción de respuestas adaptativas. Estudios recientes han puesto de relieve, además, la importancia de la percepción social del cambio climático en estos territorios, evidenciando la necesidad de reforzar la educación ambiental desde enfoques próximos y contextualizados (Correa et al., 2023), así como de atender a las particularidades del sistema climático regional (Dorta et al., 2018).

En este contexto, la formación inicial del profesorado emerge como un elemento clave para transformar la enseñanza de la sostenibilidad y el cambio climático, al constituir el espacio en el que se configuran tanto los conocimientos como las prácticas didácticas futuras. Desde esta perspectiva, la presente comunicación se plantea como una aportación orientada a explorar nuevas formas de abordar estos contenidos en el ámbito universitario, a través del diseño e implementación de propuestas basadas en metodologías activas, con el objetivo de mejorar la preparación del futuro profesorado de Educación Primaria ante los retos ambientales contemporáneos.

METODOLOGÍA

La metodología utilizada partió de un enfoque aplicado, descriptivo y evaluativo, centrado en una experiencia de innovación docente desarrollada en la asignatura Geografía del Mundo Actual del Grado en Maestro/a en Educación Primaria de la Universidad de La Laguna durante los cursos académicos 2024-2025 y 2025-2026. La propuesta se apoya en metodologías activas en las que el alumnado asume un papel protagonista en su propio aprendizaje, recurriendo al Aprendizaje Basado en Proyectos (ABP), el trabajo colaborativo y la evaluación formativa como ejes principales de la intervención.

El desarrollo de la experiencia se organizó mediante grupos de trabajo, tanto estables como de composición progresiva, que debían afrontar tareas encadenadas relacionadas con problemas reales sobre sostenibilidad y cambio climático. Con ello se busca favorecer la cooperación, la responsabilidad compartida y el desarrollo de competencias transversales recogidas en el currículo como la comunicación, el pensamiento crítico y la competencia digital. La propuesta se concretó en tres prácticas: (1) la elaboración e interpretación de climogramas; (2) el análisis de los Espacios Naturales Protegidos de Canarias como recurso para la educación ambiental; y (3) el diseño de materiales didácticos sobre cambio climático.

El seguimiento del proceso se apoyó en guías de trabajo, rúbricas de evaluación, actividades de coevaluación entre iguales y retroalimentación continua por parte del profesorado. Para conocer la valoración del alumnado, se aplicó un cuestionario, con preguntas tipo Likert centradas en el grado de satisfacción, la utilidad percibida y la mejora del aprendizaje. Participaron en el estudio 99 estudiantes, cifra que representa el 61,1% del total del alumnado matriculado en la asignatura (162). Este volumen de respuesta garantiza una representatividad suficiente para el análisis, con un nivel de confianza del 95% y un margen de error de ±6,2%. Los datos obtenidos fueron tratados mediante técnicas de estadística descriptiva, centradas en el cálculo de frecuencias absolutas y relativas, así como en la obtención de medias para valorar las respuestas del cuestionario.

RESULTADOS

El análisis de las valoraciones efectuadas por el alumnado refleja una valoración positiva de la experiencia desarrollada mediante metodologías activas y trabajo colaborativo. Considerando la proyección sobre 99 respuestas válidas, la puntuación media global del cuestionario se sitúa en 6,13 puntos sobre 7, lo que evidencia un elevado grado de satisfacción del alumnado.

Los resultados más favorables se relacionan con la organización y el acompañamiento prestado por el cuerpo docente. El aspecto mejor valorado fue la explicación previa del plan de trabajo y de los objetivos planteados (6,76/7), seguido de la percepción de preparación del profesorado para aplicar este tipo de metodologías (6,66/7) y la satisfacción con la asignación de grupos (6,64/7). Asimismo, el alumnado destacó haberse sentido protagonista de su propio aprendizaje (6,43/7) y valoró positivamente el uso de rúbricas como herramienta para organizar el trabajo y comprender los criterios de evaluación (6,40/7). Más del 90% del alumnado manifestó niveles de acuerdo o alto acuerdo en la mayoría de los ítems analizados.

Por su parte, la valoración de las actividades planteadas fue igualmente positiva, ya

que el alumnado otorgó puntuaciones superiores a 6 puntos sobre 7 en los ítems relacionados con la utilidad práctica de las tareas realizadas y su aplicación futura en el aula de Educación Primaria.

Las puntuaciones más bajas, aunque también positivas, se registraron en la satisfacción con la evaluación realizada entre compañeros/as (5,31/7) y en relación con la percepción de obtener mejores resultados frente al trabajo individual (5,33/7), lo que sugiere un margen de mejora en los procesos de coevaluación.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos permiten reafirmar que las metodologías activas representan una estrategia eficaz para trabajar la sostenibilidad y el cambio climático en la formación inicial del profesorado de Educación Primaria. La alta valoración expresada por el alumnado y las puntuaciones registradas muestran que propuestas basadas en el Aprendizaje Basado en Proyectos (ABP), el trabajo colaborativo y la evaluación formativa favorecen aprendizajes útiles, cercanos a la práctica docente y con mayor implicación por parte del estudiantado. En esta misma línea, Pichastor y Rosaleñ (2025) destacan que este tipo de enfoques contribuyen a generar aprendizajes más críticos, contextualizados y orientados a la acción.

Uno de los aspectos mejor valorados ha sido la organización general de la experiencia, especialmente la claridad en los objetivos, la secuencia de tareas y el acompañamiento prestado por el profesorado. Esto sugiere que innovar en el aula no consiste únicamente en introducir nuevas dinámicas, sino en diseñar procesos bien estructurados donde el alumnado comprenda qué hace, para qué lo hace y cómo avanzar. Además, el hecho de que buena parte del estudiantado manifestara haberse sentido protagonista de su aprendizaje refuerza la necesidad de superar modelos centrados exclusivamente en la transmisión de contenidos, cuestión ya apuntada por Martínez y López (2016) y también por Morote (2020), entre otros.

Además, las actividades desarrolladas aportan resultados de interés. La elaboración de climogramas permitió trabajar la interpretación climática desde una perspectiva aplicada; el análisis de los Espacios Naturales Protegidos facilitó conectar el aprendizaje con la realidad territorial canaria; y el diseño de materiales didácticos sobre cambio climático acercó al alumnado a situaciones similares a las que encontrará en su futura labor docente. Todo ello cobra especial sentido en Canarias, un territorio especialmente vulnerable a los efectos del cambio climático. Tal y como apuntan Correa et al. (2023), la manera en que la población percibe el cambio climático es un aspecto fundamental para propiciar cambios de comportamiento y promover respuestas efectivas desde la educación.

No obstante, algunos resultados invitan a la reflexión. Las puntuaciones relativamente más bajas vinculadas a la coevaluación entre iguales y la comparación que realizan los estudiantes con el trabajo individual indican que todavía existen ciertas reticencias o dificultades en este tipo de dinámicas. Probablemente sea necesario dedicar más tiempo a explicar el sentido pedagógico de la evaluación compartida, clarificar roles dentro de los grupos y reforzar herramientas que favorezcan una participación equilibrada.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento al estudiantado del Grado en Maestro/a en Educación Primaria de la Universidad de La Laguna participante durante los cursos académicos 2024-2025 y 2025-2026, cuya implicación, compromiso y colaboración hicieron posible el desarrollo de esta experiencia docente. Asimismo, este trabajo se enmarca en el Proyecto de Innovación y Transferencia Educativa de la Universidad de La Laguna titulado “El uso del aprendizaje basado en proyectos en la articulación de estrategias destinadas a la adquisición de competencias transversales sobre trabajo colaborativo, habilidades comunicativas y pensamiento crítico en contextos laborales”.

REFERENCIAS

Correa, J., López-Díez, A., Dorta, P., & Martín, N. (2023). La percepción del cambio climático en espacios insulares: el caso de Tenerife. (2023).*Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles, 96*. https://doi.org/10.21138/bage.3342

Dorta, P., López-Díez, A., & Díaz-Pacheco, J. (2018). El calentamiento global en el Atlántico Norte Suroriental. El caso de Canarias. Estado de la cuestión y perspectivas de futuro. *Cuadernos Geográficos, 57*(2), 27-52. https://doi.org/10.30827/cuadgeo.v57i2.5934

Martínez, R., & López, J.A. (2016). La enseñanza de la climatología en los manuales escolares de Ciencias Sociales en Educación Primaria. En R. Sebastiá y E. Tonda (Eds.), *La investigación e innovación en la enseñanza de la Geografía* (pp. 245-258). San Vicente del Raspeig, España: Servicio de Publicaciones de la Universidad de Alicante.

Morote, A.F. (2020). ¿Cómo se trata el tiempo atmosférico y el clima en la Educación Primaria? Una exploración a partir de los recursos y actividades de los manuales escolares de Ciencias Sociales. *Espac. Tiempo Forma Ser. VI Geogr, 13*, 247-272. http://dx.doi.org/10.5944/etfvi.13.2020

Pichastor, M. B., & Rosaleñ, R. C. (2025). Metodologías activas, sostenibilidad y objetivos de desarrollo sostenible. Etic@ net. *Revista científica electrónica de Educación y Comunicación en la Sociedad del Conocimiento, 25*(1), 158-184. https://doi.org/10.30827/eticanet.v25i1.32696

INCERTIDUMBRE EN LA RESPUESTA DEL ATLÁNTICO NORTE A LA MITIGACIÓN DE AEROSOLES, OZONO TROPOSFÉRICO Y SUS PRECURSORES

Alba SANTOS-ESPESO[1,2], Pablo ORTEGA[1],
María GONÇALVES AGEITOS[1,2], Jon ROBSON[3]

[1] *Barcelona Supercomputing Centre - Centro Nacional de Supercomputación (BSC-CNS)*
[2] *Universitat Politécnica de Catalunya (UPC)*
[3]*National Centre for Atmospheric Science (NCAS), University of Reading (UoR)*

alba.santos@bsc.es, pablo.ortega@bsc.es, maria.goncalves@bsc.es,

RESUMEN

Los forzadores climáticos de vida corta (SLCFs, del inglés), como los aerosoles, el ozono troposférico y sus precursores, perjudican la calidad del aire al tiempo que influyen en el clima. Estas especies mitigan parcialmente el cambio climático generado por los gases de efecto invernadero debido al efecto neto de enfriamiento de los aerosoles. Las políticas de mitigación de SLCFs pueden, por tanto, agravar la desestabilización de regiones particularmente sensibles como el océano Atlántico Norte, haciendo fundamental evaluar su impacto climático. Este trabajo analiza la respuesta futura del Atlántico Norte durante 2025–2054 bajo diferentes escenarios de reducción de SLCFs, utilizando datos de siete modelos climáticos participantes en la iniciativa AerChemMIP-CMIP6. Los resultados muestran una alta variabilidad intermodelo, reflejando diferencias sustanciales en la representación de procesos físicos. No obstante, la mayoría de los modelos simulan un debilitamiento de la Circulación Meridional de Retorno del Atlántico (AMOC, del inglés) así como una reducción de la concentración de hielo marino en el Ártico. A través de la contextualización de la incertidumbre se pretende facilitar la interpretación de las respuestas climáticas así como la mejora de los propios modelos.

Palabras clave: SLCFs, aerosoles, Atlántico Norte, AMOC, modelos

ABSTRACT

Short-lived climate forcers (SLCFs), such as aerosols, tropospheric ozone, and their precursors, degrade air quality while also influencing the climate. These species partially mitigate climate change caused by greenhouse gases due to the net cooling effect of aerosols. SLCF mitigation policies may therefore accelerate the destabilisation of particularly sensitive regions such as the North Atlantic Ocean, making it essential to assess their climate impact. This study analyzes the future

response of the North Atlantic region during 2025–2054 under different SLCF reduction scenarios, using data from seven climate models participating in the AerChemMIP-CMIP6 initiative. The results show high inter-model variability, reflecting substantial differences in the representation of physical processes. However, most models simulate a weakening of the Atlantic Meridional Overturning Circulation (AMOC) as well as a reduction in Arctic sea ice concentration. By contextualizing the uncertainty, we aim to facilitate the interpretation of climate responses as well as the improvement of the models themselves

Key words: SLCFs, aerosols, North Atlantic, AMOC, climate models

INTRODUCCIÓN

Los SLCFs desempeñan un papel clave en la calidad del aire y, por tanto, en la salud pública, al tiempo que influyen en el clima. En particular, los aerosoles ejercen un efecto radiativo neto negativo que ha compensado parcialmente el calentamiento provocado por los gases de efecto invernadero a lo largo del siglo XX. Este enfriamiento se produce a través de la reflexión de radiación solar directa (aerosoles de dispersión) e indirecta (interacciones aerosol-nube). Por el contrario, el ozono troposférico así como otras especies de aerosoles, como el carbono negro, contribuyen al calentamiento reteniendo la radiación (Szopa et al., 2021).

En el Atlántico Norte se pueden desarrollar eventos potencialmente desestabilizadores del clima como el deshielo de Groenlandia, el colapso de la convección en el giro subpolar o el colapso de la AMOC (Lenton et al., 2025), lo que la convierte en una región prioritaria para el estudio. Investigaciones previas han analizado la respuesta del Atlántico Norte a distintos forzadores radiativos, incluyendo a los aerosoles. Hassan et al. (2022) mostraron que la reducción de SLCFs antropogénicos puede debilitar la convección en el giro subpolar y a su vez la AMOC. Por el contrario, Liu et al. (2024) vincularon el aumento de aerosoles asiáticos con un debilitamiento de la circulación atlántica a través del desplazamiento del chorro extratropical. La discrepancia entre estudios refleja la incertidumbre en la modelización de la dinámica oceánica atlántica. El objetivo de este trabajo es caracterizar la incertidumbre en la respuesta del Atlántico Norte a futuras políticas de mitigación de SLCFs, empleando el mayor número disponible de modelos.

METODOLOGÍA

Para estimar el impacto climático de la mitigación de SLCFs realizamos un análisis multimodelo comparando dos experimentos dentro de la iniciativa AerChemMIP-CMIP6 (Collins et al., 2017): SSP3-7.0 y SSP3-7.0-lowNTCF. Ambos siguen un escenario de alta contaminación (SSP3; Riahi et al., 2017), pero el segundo incorpora

reducciones en las emisiones de aerosoles, ozono troposférico y sus precursores según un escenario con políticas más estrictas (SSP1). Por tanto, la diferencia entre experimentos permite aislar la respuesta climática a la mitigación de estas especies. Los siete modelos seleccionados para el estudio son: BCC-ESM1, CESM2-WACCM, EC-Earth3-AerChem, GISS-E2-1-G, MPI-ESM-1-2-HAM, MRI-ESM2-0, NorESM2-LM. Todos ellos han contribuido a los experimentos de interés con al menos tres realizaciones y cuentan con componentes interactivos de aerosoles y química troposférica, además de proporcionar las variables necesarias para evaluar la circulación oceánica atlántica.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La comparación entre simulaciones refleja la reducción de concentraciones de aerosoles y ozono troposférico como resultado de la mitigación de emisiones. Dicha reducción se produce más intensamente en el sur y este asiático (punteados en Figura 1), a diferencia del siglo pasado, en el que las emisiones eran más intensas en Europa y Norteamérica (Szopa et al., 2021). Esta variación en la distribución geográfica del forzamiento plantea un posible cambio en los impactos climáticos de los SLCF con respecto al periodo histórico. La respuesta multimodelo de la temperatura en superficie (*tas*) a la mitigación de SLCFs muestra un calentamiento en el hemisferio norte coherente con la reducción de aerosoles (Figura 1a). Dicho calentamiento es relativamente menor al sur de Islandia, reproduciendo un patrón conocido como "warming hole" o "mancha fría" que se relaciona con un debilitamiento de la AMOC (Li & Liu, 2025).

Asimismo, la incertidumbre intermodelo alcanza su máximo sobre los mares de Noruega, Barents y Kara, donde los modelos muestran respuestas de *tas* de diferente signo (no se muestra). Estos mares están caracterizados por la extensión y evolución del hielo marino, de modo que una distinta sensibilidad del hielo a los forzamientos radiativos entre modelos podría explicar la incertidumbre observada. En lo que respecta a la respuesta oceánica, la incertidumbre se concentra sobre las corrientes del Golfo y del Atlántico Norte (Figura 1b, c). A pesar de la variabilidad, la respuesta multimodelo en el Atlántico Norte subtropical refleja un dipolo: calentamiento y salinificación al oeste y enfriamiento y desalinificación al este. Este patrón puede indicar cambios en la posición y/o intensidad de la corriente del Golfo, conocida por los sesgos en su modelización, especialmente en modelos de baja resolución (Moreno-Chamarro et al., 2022). La reducción de salinidad generalizada en el Atlántico Norte y en los mares del Ártico concuerda tanto con un debilitamiento de la AMOC, que reduciría el transporte de aguas salinas hacia el norte, como con una intensificación del deshielo. De hecho, al final del periodo de estudio se detecta una reducción estadísticamente significativa tanto de la AMOC como de la concentración de hielo marino en la región ártico-atlántica (10°W-70°E, 65°N-85°N; no se muestra).

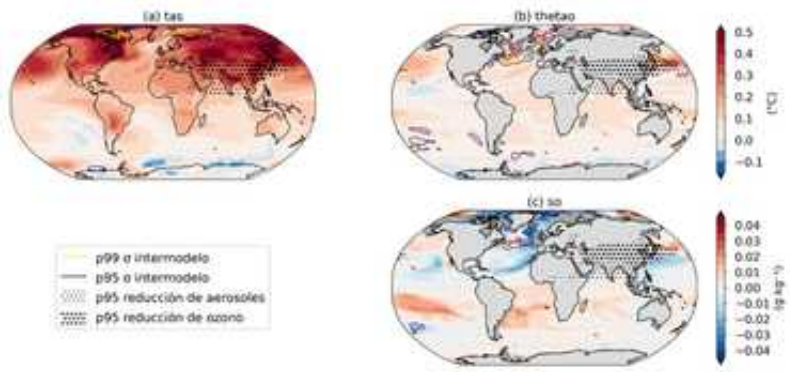


Figura 1. Respuesta multimodelo a la mitigación de SLCF (colores) y su desviación estándar en el espacio de modelos (contornos). La señal representa la diferencia entre los experimentos (ssp370-lowNTCF - ssp370) en el periodo 2025-2054. (a) Temperatura en superficie, y promedio en los primeros 500m de la columna de agua de (b) temperatura potencial y (c) salinidad. Los punteados representan las zonas de máxima reducción del espesor óptico de aerosoles y de la concentración de ozono a 500hPa. Fuente: Elaboración propia

CONCLUSIONES

Para evaluar la respuesta climática a políticas de mitigación de emisiones de SLCFs durante el periodo 2025-2054, se han comparado los escenarios SSP3-7.0 y SSP3-7.0-lowNTCF dentro del protocolo AerChemMIP-CMIP6 en un conjunto de siete modelos. El Atlántico Norte emerge como la región con mayor incertidumbre intermodelo en la respuesta climática. Posibles orígenes de esta variabilidad son una distinta sensibilidad a los forzamientos (p. ej. deshielo marino) o la incertidumbre en la propia modelización de procesos físicos clave (p. ej. AMOC, corriente del Golfo). A pesar de la incertidumbre, a mediados de siglo la mitigación de SLCFs provoca un debilitamiento de la AMOC y una reducción estadísticamente significativa de la concentración de hielo marino en la región ártico-atlántica. Estos resultados reflejan la necesidad de ampliar los conjuntos de simulaciones y de mejorar la representación del clima atlántico en los modelos, con el fin de disminuir la incertidumbre y ofrecer proyecciones más robustas.

AGRADECIMIENTOS

La investigación que ha dado lugar a estos resultados ha recibido financiación de la UE a través del programa Horizon Europe bajo el acuerdo de beca nº GA 101056783 así como de la AXA Research Fund a través de la AXA Chair on Sand and Dust Storms en el BSC-CNS.

REFERENCIAS

Collins, W. J., Lamarque, J., Schulz, M., Boucher, O., Eyring, V., Hegglin, M. I., Maycock, A., Myhre, G., Prather, M., Shindell, D., & Smith, S. J. (2017). AerChemMIP: quantifying the effects of chemistry and aerosols in CMIP6. *Geoscientific Model Development*, *10*(2), 585–607. https://doi.org/10.5194/gmd-10-585-2017

Hassan, T., Allen, R. J., Liu, W., Shim, S., Van Noije, T., Sager, P. L., Oshima, N., Deushi, M., Randles, C. A., & O'Connor, F. M. (2022). Air quality improvements are projected to weaken the Atlantic meridional overturning circulation through radiative forcing effects. *Communications Earth & Environment, 3*(1). https://doi.org/10.1038/s43247-022-00476-9

Lenton, T., Milkoreit, M., Willcock, S., Abrams, J., David, A. M., Buxton, J., Donges, J., Loriani, S., Wunderling, N., Alkemade, F., Barrett, M., Constantino, S., Powell, T., Smith, S. R., Boulton, C., Dennis, D. P., Dijkstra, H. H., Pearce-Kelly, P., Pinho, P., & Roman-Cuesta, R. M. (2025). Global Tipping Points Report 2025. En *Zenodo* https://doi.org/10.5281/zenodo.18163977

Li, K., & Liu, W. (2025). Weakened Atlantic Meridional Overturning Circulation causes the historical North Atlantic Warming Hole. *Communications Earth & Environment*, *6*(1). https://doi.org/10.1038/s43247-025-02403-0

Liu, F., Li, X., Luo, Y., Cai, W., Lu, J., Zheng, X., Kang, S. M., Wang, H., & Zhou, L. (2024). Increased Asian aerosols drive a slowdown of Atlantic Meridional Overturning Circulation. *Nature Communications, 15*(1), 18. https://doi.org/10.1038/s41467-023-44597-x

Moreno-Chamarro, E., Caron, L., Tomas, S. L., Vegas-Regidor, J., Gutjahr, O., Moine, M., Putrasahan, D., Roberts, C. D., Roberts, M. J., Senan, R., Terray, L., Tourigny, E., & Vidale, P. L. (2022). Impact of increased resolution on long-standing biases in HighResMIP-PRIMAVERA climate models. *Geoscientific Model Development*, *15*(1), 269–289. https://doi.org/10.5194/gmd-15-269-2022

Riahi, K., van Vuuren, D. P., 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., Samir, K. C., Leimbach, M., Jiang, L., Kram, T., Rao, S., Emmerling, J., . . . Tavoni, M. (2016). 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

Szopa, S., Naik, V., Adhikary, B., Artaxo, P., Berntsen, T., Collins, W. D., Fuzzi, S., Gallardo, L., Kiendler-Scharr, A., Klimont, Z., Liao, H., Unger, N., & Zanis, P. (2021). Short-Lived Climate Forcers. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Cambridge University Press*, 817-922. https://doi.org/10.1017/9781009157896.008

PROJECTED EVOLUTION OF SARDINE AND SARDINELLA POPULATIONS IN THE CANARY CURRENT SYSTEM OVER THE 21ST CENTURY

Irene NADAL[1,2,4], Jorge LÓPEZ-PARAGES[1,2,4], José C. SÁNCHEZ-GARRIDO[1,3,4]

[1] Physical Oceanography Group, University of Málaga, Málaga, Spain
[2] Department of Applied Physics I, Faculty of Science, University of Málaga, Málaga, Spain
[3] Department of Applied Physics II, School of Telecommunications Engineering, University of Málaga, Málaga, Spain.
[4] Instituto Universitario de Biotecnología y Desarrollo Azul (IBYDA), University of Málaga, Málaga, Spain.

irenenadal@uma.es, parages@uma.es, jcsanchez@uma.es

ABSTRACT

The Canary Current System is one of the world's major eastern boundary upwelling systems, supporting a highly productive fishery reservoir that is critical to the economy and food security of north-west Africa. Small pelagic fish account for nearly 70% of total landings in this region, with round sardinella (Sardinella aurita) and European sardine (Sardina pilchardus) standing out as the most commercially and ecologically relevant. Yet, despite their importance, the influence of environmental variability on their abundance and distribution remains insufficiently understood, a limitation that is particularly problematic in the context of rapidly evolving fisheries and climate change. This study presents preliminary end-to-end projections of 21st-century sardinella and sardine abundance and distribution by coupling dynamically downscaled Earth system model solutions with an individual-based fish model. Results indicate a progressive poleward redistribution of both species, mainly associated with reduced thermal habitat suitability.

Key words: small-pelagic, Canary Current System, climate change.

INTRODUCTION

Small pelagic fish play a key ecological role by linking plankton to top predators, and account for about half of the global marine fish catch. These stocks are most abundant in Eastern Boundary Upwelling Systems, among which the Canary Current System (CanCS), off north-west Africa, is one of the most productive and ecologically significant. Its dominant species, round sardinella (Sardinella aurita) and European sardine (Sardina pilchardus), are critical socio-economic resources for the Senegalese-Mauritanian region, contributing ~450,000 tons of annual commercial landings (FAO, 2019). In recent decades, however, these fisheries have faced

increasing pressure, with fleets reporting latitudinal shifts in both species, declining abundance, and growing socio-economic vulnerability in local communities. These behaviors raise important questions about the environmental and climatic drivers shaping these populations. Recent studies suggest that variations in water temperature and food availability can affect the abundance and redistribution of small pelagic fish in north-west Africa (Cabrera-Busto et al., 2026). Yet, the pathways through which climate-driven pressures propagate from the physical environment to population-level responses in round sardinella and sardine remain poorly understood. Given rapidly evolving fisheries and uncertain climate-change impacts in the region, identifying the physical and biological processes driving abundance fluctuations is essential for sub-regional fisheries management. Here, an end-to-end modeling framework is used to provide a preliminary assessment of projected 21st-century changes in the abundance, biomass, and spatial distribution of sardine and round sardinella in the CanCS, using a full life-cycle individual-based model for both species forced by dynamically downscaled CMIP6 Earth system model solutions.

METHODS

This work builds on an existing end-to-end modeling approach previously employed to investigate sardine and anchovy variability in the CanCS (Sánchez-Garrido et al., 2019). The coupled system includes the ROMS regional ocean circulation model, the NEMURO lower-trophic-level biogeochemical model, and a full life-cycle individual-based model originally developed for sardine and anchovy, following modeling approaches developed for the California Current System (Rose et al., 2015). Here, the anchovy component is replaced by the warm-water species round sardinella (Sardinella aurita), by adapting the biological parameters of the sardine individual-based model to the specific characteristics of round sardinella. A key difference between the two target species is their thermal tolerance range, defined as 18.75–22.25 °C for S. aurita and 16.75–20.25 °C for S. pilchardus. Using this configuration, a historical simulation for 1978–2008 was first performed for calibration and evaluation, with physical initial and boundary conditions from SODA reanalysis and atmospheric forcing from ERA5 reanalysis.

Future projections for 1978-2100 were generated through one-way regional downscaling of three Earth system models from the CMIP6 ensemble under the SSP5-8.5 emissions scenario: MPI-ESM1-2-HR (Müller et al., 2018), CNRM-ESM2-1 (Séférian et al., 2019), and CMCC-ESM2 (Lovato et al., 2022). These models were selected for their inclusion of marine biogeochemical fields and their representation of a wide range of climate and productivity responses, with MPI representing lower warming and increased productivity, CMCC higher warming and reduced productivity, and CNRM an intermediate scenario. Prior to downscaling, a time-varying delta method following Pozo Buil et al. (2021) was applied to remove mean biases in the

Earth system model forcings while preserving the transient climate signal over 1978-2100.

RESULTS Y DISCUSSION

Figure 1 evaluates the historical simulations by comparing individual-based model biomass estimates and ROMS sea surface temperatures with available observed biomass estimates and reanalysis data for the region.

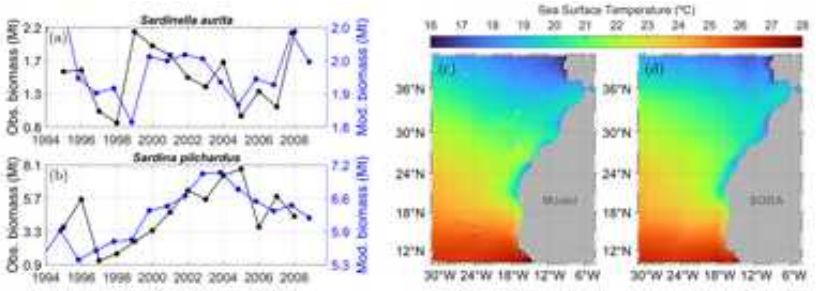


Figure 1. Left panels: Observed biomass from R/V Dr Fridtjof Nansen surveys (black) and simulated stock biomass (blue), expressed in 10^6 metric tons, for sardinella (a) and sardine (b). Right panels: Mean historical sea surface temperature (°C) from ROMS (c) and SODA reanalysis (d) over 1978-2008.

Historical stock biomass of sardinella and sardine simulated by the individual-based model agrees reasonably well with observed biomass estimates, although absolute modeled values are slightly underestimated. The simulations reproduce the main interannual variability, including peak sardinella biomass around the late 1990s followed by a gradual decrease (Figure 1a), and a progressive increase in sardine biomass toward the early 2000s followed by a subsequent decline (Figure 1b). ROMS sea surface temperature fields also show reasonable agreement with the reanalysis (Figure 1c,d), providing confidence in the model's representation of the spatial extent of the coastal upwelling region. Building on this evaluation, projected changes in fish distribution were interpreted in terms of suitable habitat, defined here as areas where environmental conditions favor individual growth and survival. Thermal suitability was defined as areas with temperatures within the species-specific tolerance range, whereas feeding suitability was estimated from a prey-based index that combines the different prey groups accessible to individuals while accounting for species-specific feeding preferences. Because temperature and food conditions also influence individual movement in the model, the resulting habitat patterns were used to explore whether potential biomass redistribution is more closely associated with future thermal or feeding conditions. Figure 2 shows the resulting spatial patterns of suitable thermal and feeding habitat for both species under the three downscaled model projections.

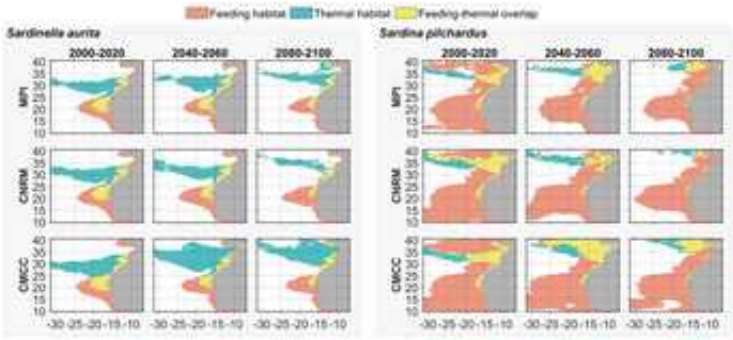


Figure 2. Suitable feeding and thermal habitats for round sardinella (left panels) and sardine (right panels) during 2000-2020, 2040-2060, and 2080-2100.

The spatial patterns of suitable habitats suggest that the projected redistribution of both species is mainly associated with changes in thermal suitability rather than with a widespread reduction in food availability. For round sardinella, feeding habitat remains relatively stable along the coastal upwelling region, whereas thermal habitat and the overlap between feeding and thermal conditions are progressively confined to a narrower latitudinal range. For sardine, feeding habitat remains broadly favorable in most projections, but thermally suitable conditions are increasingly limited to higher latitudes. Overall, despite model differences that require further analysis, the three simulations indicate a potential poleward redistribution of both species toward the end of the 21st century, mainly associated with the progressive reduction of thermally favorable habitat in the southern and central CanCS.

CONCLUSIONS

This study applies a novel end-to-end modeling approach to project future changes in round sardinella and sardine in the Canary Current System. Preliminary downscaled climate projections indicate a poleward redistribution of both species toward the end of the 21st century, mainly associated with changes in thermal habitat suitability. Future work will focus on clarifying the physical and biological mechanisms driving these responses.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by project CARDUMEN (CNS2023-144704), funded by the Spanish Ministry of Science, Innovation and Universities.

REFERENCIAS

Cabrera-Busto, J., Buttay, L., Ramírez-Romero, E., Llope, M., & Planque, B. (2026). Unraveling fishing and upwelling impacts on *Sardinella aurita* and *Sardina pilchardus* in the Canary Current Upwelling. *ICES Journal of Marine Science*, *83*(4). https://doi.org/10.1093/icesjms/fsaf242

FAO. (2019). *Report of the FAO Working Group on the Assessment of Small Pelagic Fish off Northwest Africa. Banjul, the Gambia, 26 June–1 July 2018. Rapport du Groupe de travail de la FAO sur l'évaluation des petits pélagiques au large de l'Afrique nord-occidentale. Banjul, Gambie, 26 juin–1 juillet 2018.* (1st ed.). FAO. Fishery Committee for the Eastern Central Atlantic (CECAF), Rome, Italy. https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/ca4121b

Lovato, T., Peano, D., Butenschön, M., Materia, S., Iovino, D., Scoccimarro, E., Fogli, P. G., Cherchi, A., Bellucci, A., Gualdi, S., Masina, S., & Navarra, A. (2022). CMIP6 Simulations With the CMCC Earth System Model (CMCC-ESM2). *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, *14*(3), e2021MS002814.

Müller, W. A., Jungclaus, J. H., Mauritsen, T., Baehr, J., Bittner, M., Budich, R., Bunzel, F., Esch, M., Ghosh, R., Haak, H., Ilyina, T., Kleine, T., Kornblueh, L., Li, H., Modali, K., Notz, D., Pohlmann, H., Roeckner, E., Stemmler, I., … Marotzke, J. (2018). A Higher-resolution Version of the Max Planck Institute Earth System Model (MPI-ESM1.2-HR). *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, *10*(7), 1383–1413. https://doi.org/10.1029/2017MS001217

Pozo Buil, M., Jacox, M. G., Fiechter, J., Alexander, M. A., Bograd, S. J., Curchitser, E. N., Edwards, C. A., Rykaczewski, R. R., & Stock, C. A. (2021). A Dynamically Downscaled Ensemble of Future Projections for the California Current System. *Frontiers in Marine Science*, *8*. https://doi.org/10.3389/fmars.2021.612874

Rose, K. A., Fiechter, J., Curchitser, E. N., Hedstrom, K., Bernal, M., Creekmore, S., Haynie, A., Ito, S., Lluch-Cota, S., Megrey, B. A., Edwards, C. A., Checkley, D., Koslow, T., McClatchie, S., Werner, F., MacCall, A., & Agostini, V. (2015). Demonstration of a fully-coupled end-to-end model for small pelagic fish using sardine and anchovy in the California Current. *Progress in Oceanography, Combining Modeling and Observations to Better Understand Marine Ecosystem Dynamics*, *138*, 348–380. https://doi.org/10.1016/j.pocean.2015.01.012

Sánchez-Garrido, J. C., Werner, F. E., Fiechter, J., Rose, K. A., Curchitser, E. N., Ramos, A., García Lafuente, J., Arístegui, J., Hernández-León, S., & Rodríguez Santana, A. (2019). Decadal-scale variability of sardine and anchovy simulated with an end-to-end coupled model of the Canary Current ecosystem. *Progress in Oceanography*, *171*, 212–230. https://doi.org/10.1016/j.pocean.2018.12.009

Séférian, R., Nabat, P., Michou, M., Saint-Martin, D., Voldoire, A., Colin, J., Decharme, B., Delire, C., Berthet, S., Chevallier, M., Sénési, S., Franchisteguy, L., Vial, J., Mallet, M., Joetzjer, E., Geoffroy, O., Guérémy, J.-F., Moine, M.-P., Msadek, R., … Madec, G. (2019). Evaluation of CNRM Earth System Model, CNRM-ESM2-1: Role of Earth System Processes in Present-Day and Future Climate. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, *11*(12), 4182–4227. https://doi.org/10.1029/2019MS001791

IDENTIFICACIÓN DE SECTORES SOCIALMENTE VULNERABLES ANTE EVENTOS DE INUNDACIÓN A PARTIR DEL ANÁLISIS DE LA PRENSA LOCAL EN SANTA CRUZ DE TENERIFE

Yeray HERNDÁNDEZ-GONZÁLEZ[1], María JIMÉNEZ MEJÍAS[2], Nerea MARTÍN-RAYA[2], Jaime DÍAZ-PACHECO[2], Pedro DORTA ANTEQUERA[2] y Abel LÓPEZ-DÍEZ[2]

[1]Departamento de Economía Aplicada y Métodos Cuantitativos, Universidad de La Laguna (ULL), San Cristóbal de La Laguna, España.
[2]Cátedra de Reducción del Riesgo de Desastres y Ciudades Resilientes y Grupo de Estudios en Ordenación Territorial y Riesgos (GEORIESGOS), Universidad de La Laguna (ULL), San Cristóbal de La Laguna, España;

yhergonz@ull.edu.es, mjimenem@ull.edu.es, nmartinr@ull.edu.es, jdiazpac@ull.edu.es, pdorta@ull.edu.es, alopezd@ull.edu.es

RESUMEN

Las inundaciones representan una de las principales amenazas climáticas en espacios urbanos, donde la alta exposición territorial se combina con desigualdades sociales preexistentes, por lo que identificar los sectores más vulnerables resulta esencial para diseñar estrategias eficaces de reducción del riesgo de desastres. Este trabajo presenta los resultados de una base de datos desarrollada en el proyecto REVULCLIM-TF, orientada a reconocer colectivos y áreas vulnerables mediante el análisis de la prensa local sobre episodios de inundación en Santa Cruz de Tenerife. La investigación se basa en el vaciado sistemático de noticias publicadas en medios locales y regionales relativas a cuatro eventos significativos: la riada de marzo de 2002, la tormenta tropical Delta de 2005, las lluvias torrenciales de febrero de 2010 y el episodio de octubre de 2014. A partir de estas fuentes se construyó una base de datos con 63 registros que recoge zonas afectadas, colectivos mencionados, tipologías de impacto y factores de vulnerabilidad social. Los resultados evidencian una recurrencia espacial de la vulnerabilidad, especialmente en barrios próximos a barrancos y laderas, como San Andrés, Valleseco, María Jiménez y La Alegría. Asimismo, destacan mayores impactos sobre población residente en áreas periféricas, personas mayores y pequeños comercios locales. Entre los factores más citados figuran la ocupación de cauces, la insuficiente capacidad de drenaje, la precariedad constructiva y el aislamiento temporal de núcleos poblacionales durante eventos extremos. La prensa se confirma como una fuente complementaria útil para mejorar la comprensión del riesgo urbano de inundación y apoyar estrategias de adaptación.

Palabras clave: riesgo, vulnerabilidad social, resiliencia urbana, adaptación

ABSTRACT

Floods represent one of the main climate-related hazards in urban areas, where high territorial exposure is combined with pre-existing social inequalities, making the identification of the most vulnerable sectors essential for designing effective disaster risk reduction strategies. This paper presents the results of a database developed within the REVULCLIM-TF project, which aims to identify vulnerable groups and areas by analising of local press coverage of flood events in Santa Cruz de Tenerife. The research is based on a systematic review of news published in local and regional media concerning four significant events: the March 2002 flood, tropical storm Delta in 2005, the torrential rainfall episode of February 2010, and the October 2014 event. From these sources, a database of 63 records was created, including affected areas, mentioned groups, impact typologies, and social vulnerability factors. The results reveal a spatial recurrence of vulnerability, especially in neighbourhoods located near ravines and hillsides, such as San Andrés, Valleseco, María Jiménez, and La Alegría. They also show greater impacts on residents of peripheral areas, older people, and small local businesses. The most frequently cited vulnerability factors include occupation of watercourses, insufficient drainage capacity, poor building conditions, and temporary isolation during extreme events. The press is confirmed as a useful complementary source for improving the understanding of urban flood risk and supporting adaptation strategies.

Key words: Risk, social vulnerability, urban resilience, adaptation.

INTRODUCCIÓN

Las inundaciones constituyen uno de los riesgos de origen natural con mayor impacto económico y social en áreas urbanas, especialmente en territorios insulares donde la elevada concentración de población, la escasez de suelo disponible y la ocupación histórica de espacios expuestos incrementan la vulnerabilidad. En las Islas Canarias, este peligro adquiere una especial relevancia por la combinación de precipitaciones intensas de corta duración, barrancos que reaccionan rápidamente ante las lluvias intensas y procesos urbanizadores que no integraron adecuadamente la dinámica natural del territorio. El municipio de Santa Cruz de Tenerife representa uno de los casos más significativos de todo el archipiélago, al haber registrado episodios graves como la inundación del 31 de marzo de 2002, con víctimas mortales y cuantiosas pérdidas económicas (López-Díez et al., 2018).

La investigación reciente ha puesto de manifiesto que el análisis del riesgo no puede limitarse únicamente al estudio de la peligrosidad física, sino que debe incorporar la exposición y la vulnerabilidad social, al ser factores que explican por qué determinados grupos y espacios sufren mayores impactos. En Santa Cruz de Tenerife se han identificado contrastes espaciales del riesgo asociados a la localización de

parcelas urbanas, la proximidad a cauces, las características constructivas y la desigual distribución socioeconómica de la población (López-Díez et al., 2021; Martín-Raya et al., 2025). Asimismo, existen trabajos que han evidenciado que numerosas zonas inundables coinciden con antiguos cauces ocupados, sectores altamente impermeabilizados y áreas con deficiencias en la red de drenaje, lo que incrementa notablemente la susceptibilidad ante lluvias torrenciales (Martín-Raya et al., 2024).

Por otro lado, en el contexto actual de cambio climático, es necesario impulsar políticas de adaptación. Además, es importante considerar que no solo los eventos extremos generan impacto, ya que incluso en espacios turísticos costeros del archipiélago, precipitaciones moderadas han llegado a causar daños relevantes (López-Díez et al., 2019). En este marco, el uso de fuentes complementarias resulta fundamental para avanzar en la caracterización de la vulnerabilidad urbana. La prensa local constituye un recurso especialmente útil, ya que permite identificar impactos, colectivos afectados y manifestaciones territoriales que no siempre aparecen reflejadas en las estadísticas oficiales. Además, aporta información cualitativa sobre aislamientos temporales de núcleos poblacionales, afección al pequeño comercio, dificultades de movilidad o incidencia sobre personas mayores y residentes en barrios periféricos. Estas evidencias enlazan con la necesidad de desarrollar metodologías integradas para el estudio del riesgo de inundación, combinando información física, social y territorial. Este trabajo analiza la vulnerabilidad social frente a inundaciones en Santa Cruz de Tenerife a partir del tratamiento sistemático de noticias vinculadas a eventos extremos recientes, con el objetivo de identificar patrones espaciales de afectación y sectores especialmente sensibles.

METODOLOGÍA

La metodología empleada se basó en un enfoque mixto de carácter descriptivo y espacial, centrado en la creación y explotación de una base de datos elaborada a partir del vaciado sistemático de noticias de prensa local y regional relacionadas con episodios de inundación ocurridos en Santa Cruz de Tenerife. La principal fuente utilizada fue MARESÍA (https://h3.bbtk.ull.es/index.vm?view=hemeroteca), la plataforma de digitalización y consulta de prensa histórica de la Universidad de La Laguna, complementada con otras hemerotecas y medios digitales. Para ello, se seleccionaron cuatro eventos extremos recientes de especial relevancia (la riada del 31 de marzo de 2002, la tormenta tropical Delta de noviembre de 2005, las lluvias torrenciales de febrero de 2010 y el episodio de octubre de 2014), revisando las informaciones publicadas en torno a cada episodio. Cada noticia fue codificada en una matriz de datos mediante variables relativas a fecha, localización, barrio afectado, tipo de impacto registrado, colectivos mencionados y factores de vulnerabilidad asociados. Posteriormente, la información fue depurada, clasificada y analizada estadísticamente para identificar frecuencias, recurrencias y perfiles de afectación, incorporando

además una dimensión territorial mediante la localización espacial de los registros por barrios y sectores urbanos. Esta metodología permitió detectar patrones espaciales de vulnerabilidad social y reconocer áreas y grupos especialmente sensibles frente al riesgo de inundación, complementando así otras fuentes estadísticas y cartográficas convencionales.

RESULTADOS

Los resultados obtenidos a partir de la explotación de la base de datos, compuesta por 63 registros, evidencian una clara concentración espacial de los impactos y de las manifestaciones de vulnerabilidad social en determinados sectores del municipio (Figura 1).

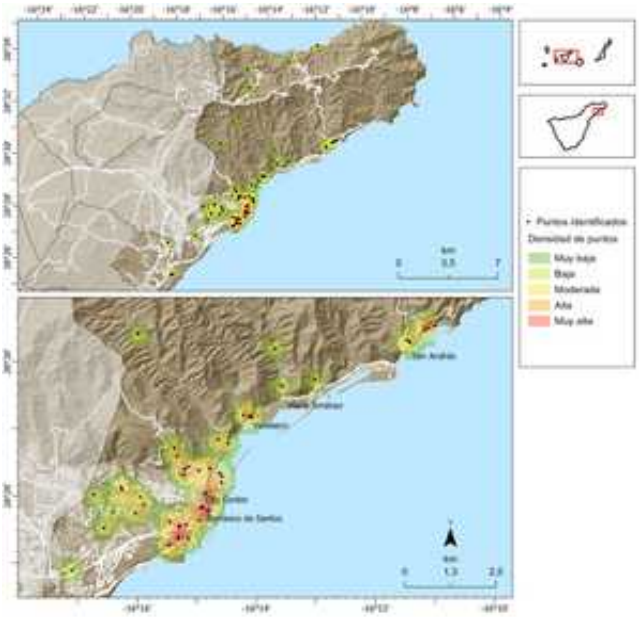


Figura 1. Distribución espacial de los registros de impacto y vulnerabilidad social asociados a episodios de inundación en Santa Cruz de Tenerife. Fuente: Elaboración propia a partir de la base de datos hemerográfica construida con información procedente de MARESÍA (Universidad de La Laguna), prensa local y OpenStreetMap.

Del total de casos recopilados, 24 corresponden a la riada de 2002, 15 a la tormenta tropical Delta de 2005, 12 a las lluvias torrenciales de 2010 y 12 al episodio de 2014. Destacan especialmente los barrios situados en el frente litoral y en torno a los principales barrancos urbanos, como San Andrés, Valleseco, María Jiménez, La Alegría, Somosierra, Taco, El Cabo-Los Llanos y áreas próximas al barranco de Santos, donde se registra una recurrencia significativa de incidencias asociadas a inundaciones, anegamientos de viviendas, interrupciones viarias y daños en comercios. En el centro urbano sobresalen afecciones recurrentes en áreas

especialmente sensibles por su elevada intensidad de servicios y elevada movilidad. Asimismo, la información periodística revela una mayor incidencia sobre población residente en barrios periféricos, personas mayores con dificultades de movilidad y pequeños negocios locales, especialmente en plantas bajas y locales comerciales. Entre los factores de vulnerabilidad más frecuentes destacan la ocupación histórica de cauces, la insuficiente capacidad de drenaje, la acumulación de escorrentías en calles con pendiente pronunciada, la precariedad de algunas edificaciones y el aislamiento temporal de núcleos costeros o de ladera durante los episodios extremos. En conjunto, la distribución de los puntos representados en la Figura 1 muestra que el riesgo no se reparte de forma homogénea, sino que responde a una combinación de condicionantes físicos, urbanos y sociales que incrementan la exposición y vulnerabilidad de determinados espacios de Santa Cruz de Tenerife.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos confirman que la vulnerabilidad frente a inundaciones en Santa Cruz de Tenerife presenta una marcada dimensión territorial y social, en línea con los planteamientos que señalan la necesidad de incorporar la exposición y la vulnerabilidad al análisis del riesgo, más allá de la peligrosidad física del fenómeno (López-Díez et al., 2021). La concentración de registros en barrios próximos a barrancos, laderas y sectores litorales evidencia que determinados espacios urbanos mantienen una mayor sensibilidad histórica ante eventos extremos, coincidiendo con áreas previamente identificadas como susceptibles debido a problemas de drenaje, ocupación de cauces y elevada impermeabilización del suelo (Martín-Raya et al., 2024; Martín-Raya et al., 2025). Asimismo, la reiterada afección a personas mayores, residentes en zonas periféricas y pequeños comercios muestra que los impactos no se distribuyen de forma homogénea, sino que responden también a desigualdades sociales preexistentes y a distintas capacidades de respuesta y recuperación.

Por todo ello, el uso de la prensa local como fuente de información se revela como una herramienta útil para complementar bases estadísticas y cartográficas convencionales, al permitir identificar impactos cotidianos y colectivos vulnerables que con frecuencia quedan invisibilizados en otras fuentes. Aunque la metodología presenta limitaciones derivadas del sesgo mediático o de la cobertura desigual entre eventos, los resultados permiten avanzar en la comprensión del riesgo urbano de inundación desde una perspectiva integrada. Además, se pone de manifiesto que Santa Cruz de Tenerife necesita reforzar sus estrategias de adaptación, prestando especial atención a los sectores más expuestos y vulnerables, e incorporando la vulnerabilidad social como eje prioritario en la planificación urbana y la gestión del riesgo.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación se enmarca en el proyecto Reducción de la vulnerabilidad y desarrollo de resiliencia social frente a los riesgos climáticos en Santa Cruz de Tenerife (REVULCLIM-TF, 2024POB30), financiado por la Fundación “la Caixa” y la Fundación CajaCanarias.

REFERENCIAS

López-Díez, A., Dorta Antequera, P., Díaz Pacheco, J., & Caraballo Acosta, O. (2018). Consecuencias de los eventos meteorológicos de rango extraordinario en Canarias: Temporales de viento, inundaciones y fenómenos costeros (1996-2016). http://hdl.handle.net/20.500.11765/9953

López-Díez, A., Díaz Pacheco, J., Ghersi Da Gama, D., Dorta Antequera, P., & Martín Raya, N. (2021). Análisis del riesgo de inundación en el municipio de Santa Cruz de Tenerife. En XXVII Congreso de la Asociación Española de Geografía (pp. 539–553).

López Díez, A., Máyer Suárez, P., Díaz Pacheco, J., & Dorta Antequera, P. (2019). Rainfall and flooding in coastal tourist areas of the Canary Islands (Spain). *Atmosphere*, 10(12), 809. https://doi.org/10.3390/atmos10120809

Martín-Raya, N., Díaz-Pacheco, J., Dorta Antequera, P., & López-Díez, A. (2024). Identifying urban prone areas to flash floods: The case of Santa Cruz de Tenerife. *Progress in Disaster Science*, 24, 100372. https://doi.org/10.1016/j.pdisas.2024.100372

Martín Raya, N., López Díez, A., Díaz Pacheco, J., Dorta Antequera, P., & Correa González, J. (2025). Identificación de áreas urbanas susceptibles a inundaciones en el Barranco de Santos (Santa Cruz de Tenerife). En XIII Congreso Internacional de la Asociación Española de Climatología. http://hdl.handle.net/20.500.11765/16745

UNCOVERING CULTURES OF RESILIENCE TO INFORM FUTURE

Carla GOMES and Abel LÓPEZ-DÍEZ

Land planning and Risks Research Group (GEORIESGOS), Chair on Disaster Risk Reduction and Resilient Cities, University of La Laguna (ULL), C/ Padre Herrera s/n, 38200 San Cristóbal de La Laguna, Santa Cruz de Tenerife, Canary Islands, Spain

carlammgomes@gmail.com; alopezd@ull.edu.es

ABSTRACT

Islands have been considered highly vulnerable to the impacts of climate change, including sea level rise and more intense extreme events such as tropical storms. However, most academic and policy attention has been focused on Small Island Developing States (SIDS), while the sub-national island jurisdictions (SNIJ) have been comparatively understudied. In this communication we address the specific climate challenges and capabilities of the Macaronesia, with a focus on the Azores (Portugal) and the Canary Islands (Spain).

Climate-related risks have interacted with other hazards in the Macaronesia, such as earthquakes and volcanic eruptions, shaping adaptive cultures over centuries of settlement. Island scholars have noted that island archives store a wealth of information that is useful for present and future adaptation efforts, by uncovering the resilience pathways that supported human settlement in these territories. For this communication, we draw insights from the analysis of historical and media archives, as well as policy instruments, spanning from the 18th to the 21st century. In this communication we present preliminary results of project MAKARIOS - Mapping Adaptation Knowledge for Atlantic Resilient Islands, a study supported by the European Union (MSCA PF 101265614) that explores cultures of adaptation in the Macaronesia, seeking to generate transferable lessons for contemporary climate adaptation governance in multi-hazard island contexts. The expected outcomes of the research should support the Macaronesia Climate Change Observatory and inform the Macaronesia Adaptation Strategy, aiming to contribute towards socially just adaptation policies for the EU outermost regions.

Keywords: Adaptation, Macaronesia, Vulnerability, Climate, Islands

INTRODUCTION

Islands have been considered highly vulnerable to the impacts of climate change, including sea level rise and more intense extreme events such as tropical storms. In

the Macaronesia, climate-related risks have interplayed with other hazards, such as earthquakes and volcanic eruptions, shaping adaptive cultures over centuries of settlement. In this communication we address the climate vulnerabilities and capabilities of the Sub-national island jurisdictions (SNIJ) of the Azores (Portugal) and Canary Islands (Spain). The Intergovernmental Panel for Climate Change (IPCC) has included SNIJ in their assessment report for the first time in 2022, a clear recognition that they deserve dedicated research and policy efforts (Mycoo et al., 2022). Climate change is also acknowledged among the most critical concerns for European islands in the 2022 EU Strategy for the Outermost Regions. A cultural lens to adaptation is needed to understand how specific adaptation trajectories have become embedded within social and environmental contexts (Marks et al., 2022) on these islands, considering the role of social capital and social memory in building community resilience.

The geographical and climatic specificities of the Macaronesian islands make them suitable for analysing the interplay between environmental risk, local knowledge systems, and climate adaptation in island contexts (Calado et al., 2010). Moreover, Macaronesia provides a particularly valuable comparative framework, as its archipelagos share common insular and environmental characteristics while presenting contrasting patterns of tourism development, economic dependency, and exposure to natural hazards (Dorta Antequera et al., 2020). This communication aims to explore how historical cultures of resilience can inform present-day climate adaptation strategies in Atlantic island territories.

METHODS

This communication draws from MAKARIOS - Mapping Adaptation Knowledge for Atlantic Resilient Islands (2026-2028), a study funded by the European Union's Horizon Europe research and innovation programme under a Marie Skłodowska-Curie Postdoctoral Fellowship (grant agreement Nr 101265614). It explores cultures of adaptation in the Macaronesia, seeking to generate transferable lessons for contemporary climate adaptation governance in multi-hazard island contexts. Within the Macaronesia, the case studies of MAKARIOS are two 'mountain islands' (Pico and Tenerife). The project explores the resilience pathways that have accommodated local, community-based responses, such as livelihood diversification, with a focus on the last 300 years through archival analysis, oral histories, and intergenerational interviews, complemented with live testimonies from four generations (people born 1935-2005).

For the purposes of this communication, we focus on traditional adaptive strategies and future projections related to the management of the water cycle. This paper derives from the first stage of MAKARIOS, focused on the role of traditional knowledge and autonomous adaptation strategies. The overall project will cover other dimensions

of climate and environmental vulnerability, and will also analyse dynamics of governance between the two studied islands, their archipelagos and 'parent' states through discourse analysis of policy instruments and a comparative case study approach.

RESULTS

A hotspot for biodiversity, resulting from their complex topography and climatic traits, the Macaronesia islands have gone through profound shifts over the last few decades. They have transitioned from isolated archipelagos, mostly dependent on agriculture and fisheries, to globally connected territories sought-after as tourist destinations.

3.1. Cultures of adaptation

Over centuries, populations of Pico and Tenerife had to manage compounded environmental risks to thrive on these islands, most notably volcanic and climatic. They adopted contrasting mobility strategies to make the most of the volcanic soil and humidity conditions. On Pico, with cooler temperatures, rural populations used volcanic walls of stone to concentrate heat along the warmer coastline, to grow vineyards and fruit trees. On the North of the island, on the Vineyard Landscape classified as UNESCO World Heritage since 2004, households would traditionally relocate during the summer months for the harvest. Conversely, on Tenerife farmers have moved up towards the mountains, to cooler areas, to be able to take advantage of 'fog water' (niebla) for vineyards and other crops. Whereas precipitation patterns are very different between these islands, both share a history of human struggle to manage environmental systems, such as the water cycle. While on Pico, with a humid sub-tropical climate, annual precipitation has been comparatively high, it is a very recent volcanic island (most recent eruptions in 1718 and 1720) with no permanent water courses. On Pico, Friar Diogo das Chagas observed, in a manuscript from the 17th century: this island lacks water, because it has no streams or perennial springs, both in the hinterland and the coast. All the water comes from the rain, which comes down from the high hills that the island has (1989 ed., p. 529).

Rain harvesting was crucial for local livelihoods on the island. Along the coast, wells (poços de maré) were built where the local community would collect brackish water during the low tide. Cisternas (water tanks for rainwater) became common in households only in the 19th century, reflecting concerted efforts to improve water security. In the Canary Islands, we observe the centrality of community-based networks for local resilience, such as the Heredades de Aguas. Despite low precipitation, still to this day most potable water on the island is mountain water, sourced through galleries carved in the volcanic subsoil. It was also in the 19th century, with the expansion of irrigated cultures (e.g., sugarcane) and population growth that water infrastructure expanded to manage scarcity.

"The intensification of work in the collection of groundwater, drilling galleries in the Madres del Agua, the opening of wells in those places where the aquifers allow it and the exploitation of fountains and springs, no matter how small, in many cases joining the flows, was to be the modus vivendi of the Canarian population until the second half of the nineteenth century" (Gómez Gómez and Bartolomé, 2006, p. 24). With tourism growth, water consumption has increased sharply over the last few decades, and therefore seawater desalination has become more important to secure access to quality water on the island. On both islands, ancient laurel forests (Laurissilva) have played a determinant role in capturing humidity and nurturing the soil, remaining today crucial ecosystems for biodiversity and climatic equilibrium (Santamarta et al., 2014). On Tenerife, the 'sea of clouds' (mar de nubes) that often covers the Laurissilva forest has allowed populations to collect fog water, through collectors (captadores de niebla), a clear example of a traditional practice that has been maintained and adapted to the present day.

On both islands, there has been a sharp increase in tourism, which rapidly became a pillar for the local economy. Since the 1970s, Tenerife became one of the earliest mass tourism island destinations in Europe. In Pico, with a climate less suited for 'beach and sun' tourism, this trend is even more recent. Tourist visitors increased fivefold in the 2000s, from 257,017 in 2001 to 1,3 million in 2025 (SREA, 2026). On one hand, this contributed towards local resilience through livelihood diversification, on the other hand has brought about enormous socio-environmental challenges, including housing availability and prices, overall price inflation, ecosystem protection, waste, energy and water consumption. Benefiting from a new cycle of EU funding which favoured eco and rural tourism, the Azores have sought to implement an alternative model and, in 2019, became the first archipelago in the world awarded by Earth Check as a 'sustainable tourism destination'.

3.2. Climate projections and adaptation policies

The Azores Regional Plan for Climate Change (Azores Government, 2017) identifies as key impacts for the archipelago more intense and frequent tropical storms, and a rise in mean temperatures. Exposure to storms, heavy rains and strong winds, as well as coastal risks (storm surge aggravated by sea level rise) are among the main risks for Pico Island. Landslides and floods also occur on the island, though more localised than on other islands of the archipelago. The most severe impacts of climate change in the Canary Islands are related to temperature increases (mean and maximum temperatures, heat waves), a reduction in annual precipitation and more intense storms, storm surge on coastal areas (aggravated by sea level rise) and landslides, particularly in populated 'barrancos' and in coastal towns (Martín-Raya et al., 2024). It is expected that cloud cover will be reduced in 15% (in relation to 1961-1990) (Expósito et al., 2015), descending towards the coast, a phenomenon affected by rising ocean temperature over the last 20 years (Guerra et al., 2025).

The water cycle is being disrupted, leading to drier summers and more intense water storms, which deepens both risks of water scarcity and the challenge of managing stormwater. Modern infrastructure for desalination or water reuse will normally be located in the most populated areas, which means that rural, inland and mountains areas will face specific challenges to secure water access with lower precipitation and changes in the 'sea of clouds' (Action Plan for Climate Change, Canary Islands, p. 150).

DISCUSSION Y CONCLUSIONS

This extended abstract has provided a preliminary overview of the case studies included in the MSCA project MAKARIOS, which will be developed in the Azores and the Canary Islands. We have outlined the main characteristics of the two case studies, which will guide the first stage of the project based on archival research, oral histories, and intergenerational interviews with local populations on Pico and Tenerife.

In a preliminary overview, we have characterised the case studies of the project and highlighted how adaptation trajectories have become embedded within social and environmental contexts. The mountain and forest systems of these volcanic islands have acted as an integrated socio-ecological system which, although mediated by investment in technology and infrastructures, is now challenged by accelerated climatic shifts.

Understanding these socio-ecological systems is critical to strengthen the resilience of the Atlantic 'mountain islands' in the face of present and future climate risks, particularly under projected scenarios of heavier winter storms, declining cloud cover, and drier summers.

Drawing from these historical accounts, in the next stages of the study we will inquire about the integration of local knowledge into regional and national strategies. The study will inform a broader analysis of climate governance trends in sub-national island territories, towards the future resilience of the Macaronesia archipelagos.

ACKNOWLEDGMENTS

MAKARIOS - Mapping Adaptation Knowledge for Atlantic Resilient Islands (2026-2028) has received funding from the European Union's Horizon Europe research and innovation programme under the Marie Skłodowska-Curie grant agreement Nr 101265614).

REFERENCES

Calado, H., Borges, P., Phillips, M., Ng, K., & Alves, F. (2010). The Azores archipelago, Portugal: improved understanding of small island coastal hazards and mitigation measures. *Natural Hazards*, 58(1), 427–444. https://doi.org/10.1007/s11069-010-9676-5

Chagas, F. D. das. (1989). *Espelho cristalino em jardim de várias flores* (A. T. de Matos, Dir. & Pref.; A. de F. de Meneses & V. L. G. Rodrigues, Colabs.). Secretaria Regional da Educação e Cultura. (Colecção de Fontes para a História dos Açores).

Dorta Antequera, P. J., López Díez, A., Díaz Pacheco, J., Máyer Suárez, P., & Romero Ruiz, M. D. C. (2020). Turismo y amenazas de origen natural en la Macaronesia. Análisis comparado. *Cuadernos de Turismo,* 45, 61-92. https://doi.org/10.6018/turismo.426041

Expósito, F. J., González, A., Pérez, J. C., Díaz, J. P., & Taima, D. (2015). High-resolution future projections of temperature and precipitation in the Canary Islands. *Journal of Climate*, *28*(19), 7846-7856. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0030.1

Gobierno de Canarias. (2023). Estrategia Canaria de Acción Climática. https://www.gobiernodecanarias.org/cambioclimatico/materias/estrategia-canaria-accion-climatica/

Gómez Gómez, M. A., and Pedrosa Bartolomé, J. M. (Eds.). (2006). *Agua del cielo: Documentos para la historia de Canarias* (Vol. 9). Gobierno de Canarias, Dirección General del Libro, Archivos y Bibliotecas

Governo Regional dos Açores. (2017). Programa Regional para as Alterações Climáticas. Direção Regional do Ambiente e Ação Climática. https://servicos-sraa.azores.gov.pt/grastore/DACAA/PRAC/PRAC_RelatorioTecnico.pdf

Guerra, J. C., Carrillo, J., Rodríguez, H., & Alonso-Pérez, S. (2025). Sinking of the Eastern North Atlantic Stratocumulus: Implications for the Macaronesian Cloud Forest. *Earth Systems and Environment*, *9*(3), 1543–1559. https://doi.org/10.1007/s41748-025-00655-6

Marks, D., Bayrak, M. M., Jahangir, S., Henig, D., & Bailey, A. (2022). Towards a cultural lens for adaptation pathways to climate change. *Regional Environmental Change, 22*(1). https://doi.org/10.1007/s10113-022-01884-5

Martín-Raya, N., Díaz-Pacheco, J., Antequera, P. D., & López-Díez, A. (2024). Identifying urban prone areas to flash floods: The case of Santa Cruz de Tenerife. *Progress in Disaster Science*, 24, 100372. https://doi.org/10.1016/j.pdisas.2024.100372

Mycoo, M., M. Wairiu, D. Campbell, V. Duvat, Y. Golbuu, S. Maharaj, J. Nalau, P. Nunn, J. Pinnegar, and O. Warrick, 2022: Small Islands. In: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability.* Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 2043–2121, https://doi.org/10.1017/9781009325844.017

Santamarta, J. C., Rodríguez-Martín, J., & Neris, J. (2014). Water Resources Management and Forest Engineering in Volcanic Islands. *IERI Procedia*, *9*, 129–134. https://doi.org/10.1016/j.ieri.2014.09.052

SREA - Serviço Regional de Estatísticas dos Açores (2026). Estatísticas do Turismo: Hóspedes e dormidas. https://srea.azores.gov.pt/relatorio/hospedes-dormidas-e-estada-media-ht-ter-al-p-juventude-e-p-campismo-total-acores/ (retrieved on 20 Abril 2026)

DROUGHT FUTURE PROJECTIONS IN THE MACARONESIAN ARCHIPELAGOS

J. CARRILLO[1], J. BARRANCOS[1], S. JEREZ[2], I. DARIAS[1], J. RODRÍGUEZ-RULI[1], A. J. GONZÁLEZ[1], J. C. PÉREZ[1], F. J. EXPÓSITO[1] and J. P. DÍAZ[1]

[1]Grupo GOTA, Physics Department. Universidad de La Laguna, Av. Astrofísico Francisco Sánchez, s/n, La Laguna, 38200, S.C. de Tenerife, Spain
[2]Regional Atmospheric Modelling Group, Regional Campus of International Excellence Campus Mare Nostrum, University of Murcia, Murcia 30100, Spain

jcarrill@ull.edu.es

RESUMEN

La Macaronesia, integrada por los archipiélagos de Azores, Madeira, Canarias y Cabo Verde, presenta una alta vulnerabilidad a la sequía debido a la limitada disponibilidad de agua y la dependencia de sectores sensibles a este recurso. Este estudio analiza los cambios futuros de la sequía meteorológica hacia mediados del siglo XXI (2030–2059) mediante el índice estandarizado de precipitación-evapotranspiración integrado a tres meses (SPEI-3), calculado a partir de proyecciones climáticas regionales de alta resolución bajo los escenarios SSP1-2.6 y SSP5-8.5, tomando como referencia el período 1982–2019. Los resultados muestran un calentamiento generalizado, acompañado de mayor demanda evaporativa y una intensificación de la sequía. Los cambios más acusados se proyectan en Madeira y Canarias, donde la reducción de la precipitación y el aumento de la evapotranspiración potencial amplifican los déficits hídricos. En zonas de mayor altitud se observa un calentamiento reforzado y descensos de humedad relativa y nubosidad, lo que sugiere mayor vulnerabilidad de los ecosistemas dependientes de la niebla. En contraste, Azores y Cabo Verde muestran respuestas pluviométricas más heterogéneas y menos significativas. En conjunto, se prevé que las sequías sean más prolongadas e intensas, lo que subraya la necesidad de estrategias de adaptación específicas en territorios insulares donde la altitud modula los impactos del cambio climático sobre el agua y los ecosistemas.

Palabras clave: Macaronesia, sequía, cambio climático, SPEI.

ABSTRACT

Macaronesia, comprising the archipelagos of the Azores, Madeira, the Canary Islands, and Cape Verde, shows high vulnerability to drought due to limited water availability and dependence on sectors sensitive to this resource. This study examines future changes in meteorological drought by the mid 21st century, 2030–2059, using the 3-month Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI-3), calculated from

high resolution regional climate projections under the SSP1 2.6 and SSP5 8.5 scenarios, taking 1982–2019 as the reference period. The results show widespread warming, along with rising evaporative demand and a strengthening of drought. The most pronounced changes are projected in Madeira and the Canary Islands, where reduced precipitation and increased potential evapotranspiration amplify water deficits. In higher altitude areas, enhanced warming and decreases in relative humidity and cloudiness are observed, which suggests greater vulnerability of fog-dependent ecosystems. In contrast, the Azores and Cape Verde show more heterogeneous and less significant precipitation responses. Overall, droughts are expected to be longer-lasting and more intense, which highlights the need for specific adaptation strategies in island regions, where altitude modulates the impacts of climate change on water resources and ecosystems.

Key words: Macaronesia, drought, climate change, SPEI.

INTRODUCTION

La sequía es uno de los principales riesgos climáticos para los sistemas naturales y socioeconómicos, al reducir la disponibilidad de agua, aumentar el riesgo de incendios y afectar sectores como la energía, el turismo y la agricultura. Se caracteriza por una evolución lenta y multiescalar, asociada a déficits de precipitación, mayor evapotranspiración y condiciones previas del sistema. En el contexto de calentamiento global, su intensificación ha sido ampliamente documentada en regiones subtropicales y semiáridas, donde el aumento térmico amplifica los déficits hídricos incluso sin descensos significativos de precipitación (Gebrechorkos et al., 2025; Ji et al., 2026; Noguera et al., 2022).

La Macaronesia constituye un laboratorio climático idóneo, con una marcada diversidad latitudinal y topográfica que combina climas templado-húmedos en el norte y condiciones semiáridas y áridas en el sur, junto con una alta dependencia de recursos hídricos limitados y ecosistemas endémicos y vulnerables. No obstante, los estudios regionales son escasos y a menudo limitados por la resolución de los modelos globales, insuficiente para representar los gradientes altitudinales y microclimas.

En este trabajo se evalúa la evolución futura de la sequía en la Macaronesia mediante variables climáticas regionalizadas, analizando cambios en la duración e intensidad de eventos secos para 2030–2059 bajo los escenarios SSP1-2.6 y SSP5-8.5 respecto a 1982–2019. Este enfoque es especialmente relevante en la región, donde pequeñas variaciones climáticas pueden generar cambios sustanciales en los recursos hídricos y los ecosistemas.

METHODS

La evolución espacio-temporal de la sequía en la Macaronesia se ha evaluado mediante el índice Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI), que integra precipitación (P) y demanda evaporativa para cuantificar la disponibilidad hídrica (Vicente-Serrano et al., 2010). La evapotranspiración potencial (PET) se estimó con el método Penman–Monteith FAO-56 a partir de temperatura, viento, altitud, latitud y nubosidad (Allen et al., 1998), utilizando variables procedentes de simulaciones regionales con el modelo WRF (Skamarock et al., 2019) a 3 km de resolución como se describe en Rodríguez-Rull et al. (2026). El balance hídrico mensual (P − PET) se acumuló a escala de 3 meses y se ajustó a una distribución log-logística mediante L-moments, transformándose posteriormente a una normal estándar para obtener el SPEI. Los eventos de sequía se definieron como periodos con SPEI < −1 durante al menos dos meses consecutivos, calculándose la duración, la intensidad y el área afectada (Gebrechorkos et al., 2025).

RESULTS Y DISCUSSION

3.1. Cambios termodinámicos e intensificación de demanda evaporativa

A mediados del siglo XXI (2030–2059), la Macaronesia muestra un calentamiento generalizado respecto a 1982–2019 (Fig. 1). Bajo SSP1-2.6 y SSP5-8.5, las temperaturas máximas aumentan significativamente (p<0,1), con mayores incrementos en zonas elevadas. Este calentamiento intensifica la demanda evaporativa y agrava el déficit hídrico Δ(P − PET), especialmente en los archipiélagos centrales. Aunque más moderadas bajo SSP1-2.6, estas tendencias apuntan a una transición hacia condiciones más áridas.

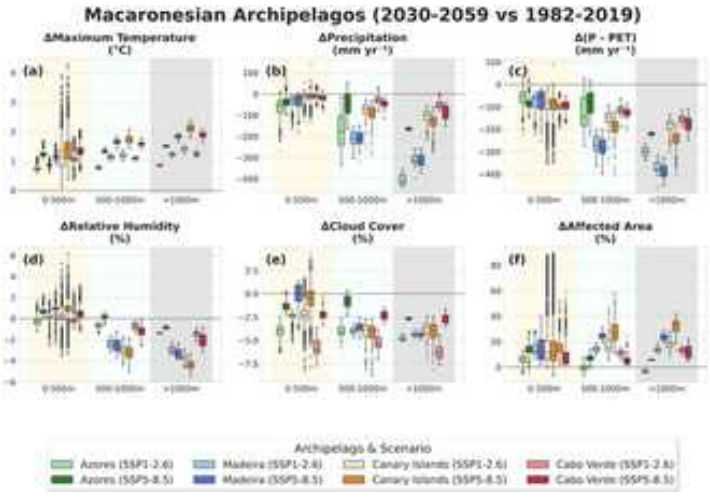


Figura 1: Cambios proyectados en diferentes variables considerando los tres rangos altitudinales analizados: 0–500 m, 500–1000 m y >1000 m.

3.2. Redistribución de la precipitación y dinámica de la nubosidad

Al analizar tres bandas altitudinales (0–500 m, 500–1000 m y >1000 m), se observa que los efectos del cambio climático aumentan con la altitud. Las mayores reducciones de humedad relativa y nubosidad se concentran por encima de 500 m (Fig. 1), donde se sitúa el banco de estratocúmulos. La disminución proyectada de esta capa nubosa podría exponer ecosistemas como la laurisilva a mayor sequedad y estrés térmico. Este patrón sugiere una expansión de la célula de Hadley y cambios en la inversión de subsidencia, un proceso clave en la formación de estratocúmulos y la precipitación horizontal. Estudios recientes indican, además, un descenso en la altura de estas nubes (Guerra et al., 2025; Antequera & González, 2025), lo que podría agravar la sequía.

3.3. Expansión e intensificación de los regímenes de sequía

La combinación de menor precipitación y mayor demanda evaporativa proyectan un cambio drástico sistémico en la sequía regional (Fig. 2). La duración de los eventos aumenta en todos los archipiélagos, convirtiendo la sequía en una condición casi permanente en Madeira y Canarias. En contraste, Azores y Cabo Verde, menos afectados por la amplificación de la célula de Hadley, muestran respuestas más irregulares y cambios poco significativos en la precipitación. En conjunto, estas tendencias indican una desviación del rango de variabilidad histórica, con implicaciones para la seguridad hídrica, la agricultura y la biodiversidad endémica.

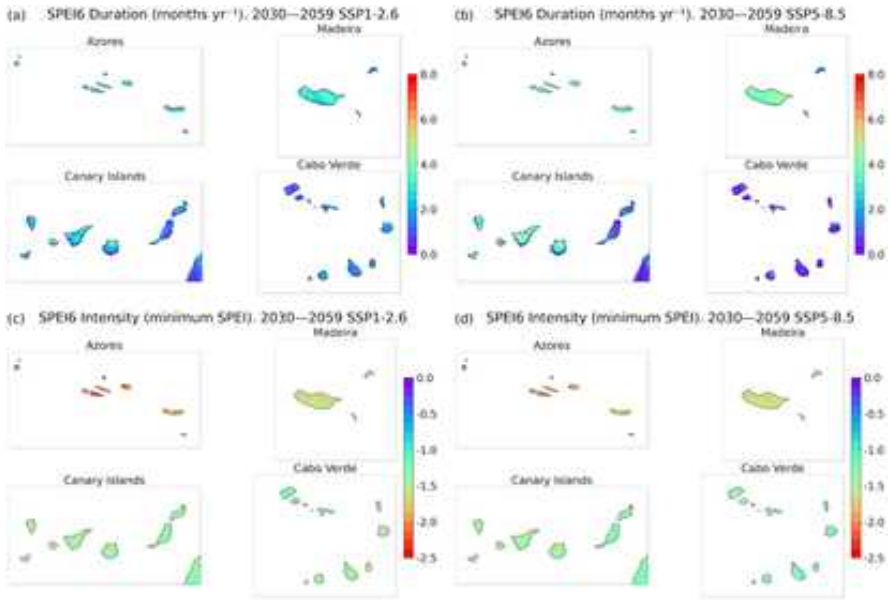


Figura 2: Duración de las sequías (meses por año) (a–b) e intensidad (valor mínimo del SPEI) (c–d) para el índice SPEI calculado a una escala temporal de 3 meses.

CONCLUSIONS

Las proyecciones muestran que la Macaronesia experimentará una intensificación generalizada de la sequía meteorológica hacia mediados del siglo XXI, debido al aumento de las temperaturas y de la demanda evaporativa. Además, los impactos del cambio climático se intensificarán con la altitud, donde se proyectan mayores aumentos térmicos y descensos de la humedad relativa y la nubosidad. La disminución del banco de estratocúmulos incrementaría la vulnerabilidad de ecosistemas dependientes de la niebla, como la laurisilva. Madeira y Canarias serán los archipiélagos más afectados, con sequías más prolongadas e intensas. En contraste, Azores y Cabo Verde presentan respuestas heterogéneas y menos significativas. El estudio evidencia la necesidad de implementar estrategias de adaptación específicas para la gestión del agua y la protección de los ecosistemas insulares.

ACKNOWLEDGMENTS

Esta investigación fue financiada por el proyecto PLANCLIMAC2 (1/MAC/2/2.4/0006), a través del Programa INTERREG MAC 2021–2027 de la Unión Europea. Asimismo, contó con el apoyo adicional del Gobierno de Canarias, a través de la Consejería de Transición Ecológica y Energía, en el marco del convenio de cooperación firmado el 8 de noviembre de 2024. Finalmente, agradecemos a WCRP CORDEX FPS-I-Mac por su apoyo y su enfoque en la región macaronésica.

REFERENCES

Antequera, P. D., & González, J. C. (2025). Methodological approach for the characterisation and trend analysis of subsidence thermal inversions: The case of the Canary Islands. Int. J. Climatol. https://doi.org/10.1002/joc.893

Guerra, J. C., et al. (2025). Sinking of the Eastern North Atlantic stratocumulus: Implications for the Macaronesian cloud forest. Earth Syst. Environ. https://doi.org/10.1007/s41748-025-00655-6

Ji, J., Miao, et al. (2026). Transition in global basins from precipitation-dominated to evaporative demand-dominated meteorological drought: Past patterns and future projections. Earth's Future.
https://doi.org/10.1029/2025EF007492

Noguera, I., et al. (2022). Drivers of early 21st-century Mediterranean drought. Geophys. Res. Lett. https://doi.org/10.1029/2021GL097703

Rodríguez-Rull, J., et al. (2026). High-resolution regional climate projections and tourism impacts in the Macaronesian archipelagos. Sci. Rep. https://doi.org/10.1038/s41598-026-43092-9

Skamarock, W. C., et al. (2019). A description of the Advanced Research WRF Model version 4. NCAR Tech. Note. https://doi.org/10.5065/1dfh-6p97

VULNERABILITY TO CLIMATE CHANGE IN THE CANARY ISLANDS COASTAL AREA: A MULTIDIMENSIONAL ANALYSIS FROM A GOVERNANCE PERSPECTIVE

Lorena NARANJO-ALMEIDA[1,2], Aridane GONZÁLEZ-GONZÁLEZ[1], Katherine SALES[3,4], Leví GARCÍA-ROMERO[1], Carolina PEÑA-ALONSO[1] y Néstor MARRERO-RODRÍGUEZ[1]

[1] *Instituto de Oceanografía y Cambio Global, IOCAG, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Spain*
[2] *Gestión y Planeamiento Territorial y Medioambiental, S.A. (Gesplan),*
[3] *Écologie Société et Évolution (ESE), Université Paris-Saclay, CNRS, AgroParisTech, Gif-sur-Yvette, France*
[4] *Laboratoire Dynamiques Sociales et Recomposition des Espaces (LADYSS), Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, CNRS, Paris, France*

lorena.naranjo@ulpgc.es, aridane.gonzalez@ulpgc.es, katherine.sales@proton.me, levi.garcia@ulpgc.es, carolina.pena@ulpgc.es, nestor.marrero@ulpgc.es

RESUMEN

Las zonas costeras de territorios insulares son altamente vulnerables al cambio climático. En las islas Canarias, el aumento del nivel del mar, la erosión y los eventos extremos se combinan con una alta densidad de población, infraestructuras críticas y una fuerte dependencia del turismo de sol y playa. Este estudio analiza la vulnerabilidad desde una perspectiva multidimensional basada en la gobernanza, utilizando los resultados del workshop 1 (WS1) del proyecto BlueGreen Governance. La vulnerabilidad se entiende como la interacción entre exposición, sensibilidad y capacidad de adaptación, integrando factores físicos, sociales, económicos e institucionales. Se evalúan seis dimensiones: subsistencia, distribución ambiental, cohesión social, capacidad financiera, agencia política, y autonomía y creación. Los resultados muestran que la vulnerabilidad va más allá de los impactos biofísicos, destacando la subsistencia y la distribución ambiental como aspectos clave. La autonomía y la creación presentan un alto potencial para la innovación y la participación. Sin embargo, la fragmentación institucional, la débil coordinación y la limitada participación restringen la adaptación. Las respuestas efectivas requieren enfoques de gobernanza integrados, basados en la ciencia y la participación.

Palabras clave: vulnerabilidad climática, gobernanza, islas, áreas costeras.

ABSTRACT

Coastal areas of island territories are highly vulnerable to climate change. In the

Canary Islands, sea level rise, erosion and extreme events intersect with dense populations, critical infrastructure and dependence on coastal tourism. This study analyses vulnerability from a multidimensional, governance-based perspective using results from Workshop 1 (WS1) of the BlueGreen Governance project. Vulnerability is understood as the interaction of exposure, sensitivity and adaptive capacity, integrating physical, social, economic and institutional factors. Six dimensions are assessed: subsistence, environmental distribution, social cohesion, financial capacity, political agency, and autonomy and creation. Results show vulnerability extends beyond biophysical impacts, with subsistence and environmental distribution as key concerns. Autonomy and creation offer strong potential for innovation and participation. However, institutional fragmentation, weak coordination and limited participation constrain adaptation. Effective responses require integrated, science-based and participatory governance approaches.

Key words: Climate vulnerability, governance, islands, coastal areas.

INTRODUCTION

Canarias afronta importantes riesgos por el aumento del nivel del mar. Según PIMA Adapta Costas, en el peor escenario unas 500 personas podrían ser reubicadas en 2050 y más de 5.000 en 2100, afectando además a infraestructuras clave. Las pérdidas por erosión e inundación en las costas podrían alcanzar el 11% del PIB, con impacto en hasta 153 playas turísticas y más de 4.500 M€ anuales a final de siglo. La alta concentración urbana y turística en la costa incrementa la vulnerabilidad frente a fenómenos extremos, especialmente en el sur de Gran Canaria (GRAFCAN et al., 2022). La presente comunicación se centra en el WS1 (“Exploring the Horizon”) del proyecto BlueGreen Governance (101086091) concretamente, en la sección de vulnerabilidad, celebrado en Gran Canaria como uno de los casos de estudio de este proyecto. El objetivo de WS1 (“Exploring the Horizon”) fue analizar la vulnerabilidad climática costera desde una perspectiva multidimensional orientada a la gobernanza en Canarias. De forma específica, los objetivos de este trabajo son (i) contextualizar el problema en Canarias, (ii) describir el diseño participativo del Workshop, (iii) comparar las seis dimensiones de vulnerabilidad evaluadas, (iv) e identificar las barreras de gobernanza y recomendaciones operativas para la adaptación.

METHODS

La metodología se apoya en un diseño mixto, descriptivo e interpretativo basado en el tratamiento y la explotación de los resultados del WS1 y, en la triangulación con la literatura científica y fuentes oficiales recientes (O’Connor et al., 2024).

La asistencia al W1 fue de 43 asistentes (37 actores del archipiélago y 6 miembros del

consorcio del proyecto). En cuanto al perfil de los asistentes: 18 personas de organismos y empresas públicas; 4 del sector económico, 15 del ámbito académico y 6 investigadores o expertos invitados en materias como la oceanografía, geografía, ordenación del territorio, juristas. Metodológicamente, en el WS1 se desarrolla la combinación de técnicas cuantitativas y cualitativas, tales como: ejercicios de votación sobre impactos en las zonas costeras, rankings de impactos climáticas y soluciones, valoración de la coordinación institucional y percepción sectorial de responsabilidades.

El análisis de las dimensiones de la vulnerabilidad en el WS1 se apoyó en una ficha individual de aportación diseñada específicamente para el estudio de caso de Canarias cuyo contenido incluía cada categoría de vulnerabilidad, el sentido de las valoraciones y una justificación de la decisión tomada. Este instrumento permitió recoger de forma homogénea la percepción de los participantes sobre las seis dimensiones de vulnerabilidad del marco conceptual: subsistencia, distribución ambiental, cohesión social, capacidad financiera, agencia política y autonomía y creación (Douguet J.M. et al., 2016).

RESULTS

Los resultados del WS1(Tabla 1) muestran un riesgo costero dominado por la subida del nivel del mar, la inundación y la erosión y los fenómenos extremos.

A nivel social, destacan la pérdida de vivienda, la posible reubicación y riesgos en servicios básicos. Económicamente, la erosión y la pérdida de playas amenazan el turismo y las infraestructuras. En el plano ambiental, se resalta la degradación de los ecosistemas costeros como barreras naturales. Esto se vinculan directamente con el diagnóstico regional de PIMA Adapta Costas Canarias, y con literatura reciente sobre vulnerabilidad turísticas y urbana en las islas (Yanes Luque et al., 2021; Ley Bosch et al., 2024).

Las dimensiones de vulnerabilidad relacionadas con la subsistencia y supervivencia, y la distribución ambiental presentan mayor urgencia y gravedad, mientras que la agencia política actúa como eje clave para activar o limitar la adaptación. Por su parte, autonomía y creación destaca por su alto potencial de desarrollo, condicionado al refuerzo institucional y la participación. La cohesión social y la capacidad financiera ocupan una posición intermedia, siendo vulnerabilidades relevantes, pero también ámbitos donde las políticas pueden reducir impactos.

Dimensión	Prioridad	Percepción del Riesgo	Potencial de desarrollo	Barreras de gobernanza asociadas
Subsistencia y supervivencia	Muy alta	Crítica/vital	Media	Exposición de viviendas, dependencia externa de agua, energía y alimentos, respuestas tardías.
Distribución ambiental	Muy alta	Crítica/vital	Media alta	Degradación de ecosistemas, desigual acceso a servicios ambientales, débil restauración preventiva.
Cohesión social	Alta	Importante	Media-alta	Participación consultiva, pérdida de identidad territorial, desigualdades entre islas y grupos sociales.
Capacidad financiera	Alta	Importante	Media	Dependencia del turismo, infrafinanciación pública, apoyo insuficiente a pymes y adaptación local.
Agencia política	Muy alta	Crítica y transversal	Media	Fragmentación competencial, burocracia excesiva, intereses sectoriales, escasa coordinación y liderazgos.
Autonomía y creación	Media en riesgo	Moderada	Muy alta	Rigidez jerárquica, falta de apoyo y recursos, escasa institucionalización de la co-creación.

Tabla 1: Síntesis comparada de las seis dimensiones de vulnerabilidad. Fuente: elaboración propia.

DISCUSSION

Los resultados del WS1 indican que la vulnerabilidad costera en Canarias no depende solo de la peligrosidad física, sino de la interacción entre exposición, sensibilidad socioeconómica y limitada capacidad adaptativa, condicionada por la gobernanza. La adaptación avanza lentamente, con respuestas parciales y pocos cambios estructurales. Dimensiones como subsistencia, distribución ambiental y agencia política reflejan un contexto de alta ocupación costera, presión urbanística y dependencia de infraestructuras, que intensifica los conflictos entre conservación, uso y adaptación. Destaca el contraste entre alto riesgo percibido y elevado potencial de autonomía e innovación, limitado por estructuras jerárquicas, falta de recursos y baja inclusividad. Se proponen tres acciones clave: mejorar la coordinación interadministrativa basada en evidencia científica, crear una fuente pública unificada de datos climáticos y priorizar medidas híbridas como restauración de dunas, protección de infraestructuras críticas y planificación de reubicaciones.

CONCLUSIONS

Los resultados del WS1 del Proyecto BlueGreen Governance, en Canarias, como caso de estudio, muestran que la vulnerabilidad climática costera en Canarias es multidimensional y se rige tanto por la exposición biofísica como por la calidad de la articulación institucional. Las dimensiones más urgentes son la de subsistencia y supervivencia, distribución ambiental y agencia política, la mayor oportunidad transformadora se sitúa en la autonomía y creación. La principal debilidad sistémica identificada es la brecha entre el conocimiento disponible, la coordinación efectiva e implementación pública.

ACKNOWLEDGMENTS

La investigación se desarrolla en el marco del Proyecto BlueGreen Governance (2024-2027), financiado por la Unión Europea, programa Horizonte Europa (101086091).

REFERENCES

Carrillo, J., González, A., Pérez, J. C., Expósito, F. J., & Díaz, J. P. (2022). Projected impacts of climate change on tourism in the Canary Islands. *Regional Environmental Change, 22*, 61. https://doi.org/10.1007/s10113-022-01880-9.

González, A. G., Peña-Alonso, C., González-Dávila, M., Santana-Casiano, J. M., González-Santana, D., Ferraro, G., Naranjo-Almeida, L., & García-Romero, L. (2025). Governance challenges for the adaptation to sea-level rise in the Canary Islands: A multilevel approach. *Ocean and Society, 2*, Article 10505. https://doi.org/10.17645/oas.10505.

Douguet J.-M., Raharinirina V., O'connor M., Roman P., 2016, Construction d'un partenariat de connaissances sur les questions de justice environnementale : Exemple du projet européen EJOLT, Éducation relative à l'environnement. Regards - Recherches - Réflexions, Centre de recherche en éducation et formation relatives à l'environnement et à l'écocitoyenneté, Volume 13-1. doi: 10.4000/ere.332.

Ley Bosch, P., de Castro González, Ó., & García Sánchez, F. (2024). Mass tourism urban destinations and climate change in small islands: Resilience to extreme rainfall in the Canary Islands. *Environment, Development and Sustainability, 26*, 10765–10785. https://doi.org/10.1007/s10668-023-03406-7.

O'Connor M., Douguet J.-M., 2024. Working deliberat(iv)ely with(in) wicked problems: The existential, epistemological and ethical nexus of imperfect knowledge, *Futures*, 163, 103436.

SOLUCIONES BASADAS EN LA NATURALEZA PARA LA MITIGACIÓN DE LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA MACARONESIA

Megan EXPÓSITO BRAZIER[1], Jelena KORITNIK[1], Noelia CRUZ PÉREZ[1], Alejandro GARCÍA GIL[2], Juan C. SANTAMARTA[1]

[1]*Universidad de La Laguna. Departamento de Ingeniería Agraria y del Medio Natural. Tenerife, España.*
[2] *Instituto Geológico y Minero de España – Consejo Superior de Investigaciones Científicas (IGME-CSIC)*

mexposito@ull.edu.es, jkoritnik@ull.edu.es, ncruzper@ull.edu.es, a.garcia@igme.es, jcsanta@ull.edu.es

RESUMEN

La escasez hídrica es uno de los principales riesgos ambientales en islas volcánicas. Esta se ve agravada por la irregularidad de las precipitaciones, la sobreexplotación de acuíferos que llevan a su deterioro y contaminación, y por los efectos del cambio climático. El objetivo de esta investigación es analizar el potencial de las Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN) para mejorar la resiliencia hídrica en islas volcánicas, concretamente en la Macaronesia. Las islas de la Macaronesia comparten una serie de condiciones geológicas y climáticas que las hace idóneas para analizar distintas estrategias para la recarga de acuíferos y mejorar la gestión del agua. Por ello, en el marco del proyecto europeo GENESIS, se están desarrollando in situ nueve demostradores piloto de SbN en la Macaronesia, seis de ellos en Canarias, entre los cuales se encuentran el uso de diques en acuíferos costeros, galerías secas, o pozos de infiltración. Entre los resultados esperados para la región macaronésica, se prevé recuperar más de 10 hm3 de escorrentía y aumentar las reservas subterráneas en más de 50 hm3/año, beneficiando a más de 35.000 habitantes en la región. Concretamente en Canarias, se espera optimizar la recarga de acuíferos mediante la reutilización de aguas pluviales y regeneradas. Además, se demostrará la viabilidad y replicabilidad de estas soluciones para mejorar la resiliencia hídrica insular.

Palabras clave: resiliencia, vulnerabilidad insular, recarga de acuíferos, gestión hídrica insular, islas volcánicas.

ABSTRACT

Water scarcity is one of the main environmental issues in volcanic islands. It is exacerbated by irregular precipitation patterns, the overexploitation of aquifers leading to their deterioration and contamination, and the effects of climate change. The aim of this research is to analyse the potential of Nature-based Solutions (NbS) to improve

water resilience in volcanic islands, specifically in the Macaronesia. The Macaronesian islands share a set of geological and climatic conditions that make them well suited to analysing different strategies for aquifer recharge and the improvement of water management. Nine NbS are being developed in situ across Macaronesia, six of them in the Canary Islands, within the framework of the European project GENESIS. These NbS include the use of dykes in coastal aquifers, dry galleries, and infiltration wells, among others. It is expected to recover more than 10 hm3 of water runoff and increase groundwater reserves over 50 hm3 per year, benefiting more than 35,000 inhabitants. In the Canary Islands, aquifer recharge is expected to be optimised through the reuse of rainwater and reclaimed water. In addition, the feasibility and reproducibility of these solutions to enhance insular water resilience will be demonstrated.

Key words: resilience, island vulnerability, aquifer recharge, insular water management, volcanic islands

INTRODUCCIÓN

Las islas pequeñas y medianas, como las de la Macaronesia, se encuentran entre las regiones más vulnerables al cambio climático (IPCC, 2023). Las islas macaronésicas comparten diversas problemáticas relacionadas con la gestión de sus recursos hídricos: la sobreexplotación de los acuíferos y su intrusión salina, población concentrada en la costa, actividad agrícola intensiva de alto consumo hídrico, turismo significativo y una estrecha relación entre agua y energía (Santamarta et al., 2022). Estas problemáticas se agravarán en un futuro, donde habrá precipitaciones más escasas pero intensas, y una mayor temperatura (Cruz-Pérez et al., 2025). Estas condiciones aumentarán la presión sobre las infraestructuras que no están preparadas para eventos extremos y sobre los acuíferos que sufrirán mayor sobreexplotación, obligando a replantear la gestión hídrica insular.

En este contexto, las Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN) cobran especial relevancia. Las SbN protegen, gestionan y restauran de manera sostenible los ecosistemas, haciendo frente a los desafíos sociales de manera efectiva y adaptativa, y proporcionando beneficios para el bienestar humano y la biodiversidad (UICN, 2020). Sus beneficios potenciales para reducir la presión sobre las infraestructuras han impulsado su implementación (Singhvi et al., 2022).

En este marco, el proyecto GENESIS analiza el potencial de las SbN para mejorar la recarga de los acuíferos y la resiliencia hídrica en las islas volcánicas macaronésicas, mediante la implementación de distintas soluciones a escala local y regional que puedan ser replicadas en otros territorios insulares vulnerables.

METODOLOGÍA

El proyecto GENESIS implementa y evalúa nueve Soluciones basadas en la Naturaleza en seis islas de la Macaronesia: El Hierro, La Palma y Gran Canaria (Canarias), Faial (Azores), Madeira (Portugal) y Santiago (Cabo Verde); para reducir la vulnerabilidad territorial frente a eventos extremos como sequías o inundaciones, y fortalecer la resiliencia climática insular. Para ello se ha realizado un diagnóstico territorial caracterizando las condiciones hidrológicas iniciales y futuras (régimen pluviométrico, balance hídrico, recarga de acuíferos) (Reyes Parrilla, 2025), y un inventario de infraestructuras hídricas críticas (fuentes de abastecimiento, canales, embalses, desalinizadoras, redes de distribución). Sobre esta base, se ha realizado un análisis de su vulnerabilidad frente a distintas amenazas naturales, identificando las fortalezas y puntos críticos de los sistemas hídricos, y reforzando la relevancia de las SbN para la resiliencia de estos (Santamarta Cerezal et al., 2025). Las SbN, reflejadas en la Tabla 1, se han diseñado según criterios de simplicidad constructiva, versatilidad climática y viabilidad económica, para complementar y reforzar las infraestructuras hídricas convencionales (infraestructura gris). En la fase actual del proyecto se están construyendo los pilotos, desarrollándose los modelos hidrológicos e hidrogeológicos para optimizar la captación, almacenamiento y distribución del agua, y realizando procesos de participación comunitaria. El desempeño de las SbN se evaluará mediante indicadores cuantitativos (volumen de agua captada y almacenada, eficiencia de recarga) y cualitativos (mejora de parámetros físico-químicos, reducción de contaminantes).

Lugar	Isla	Actuación prevista	Papel de la SbN
Pozo de Los Padrones	El Hierro (Canarias)	Análisis en cierres hidráulicos	Analizar el uso de diques para resiliencia climática
Barlovento	La Palma (Canarias)	Diques como barreras hidráulicas	Mejorar la gestión del agua, controlando el caudal extraído
Trasvase	La Palma (Canarias)	Presa de diques volcánicos	Transferencia hídrica del lado húmedo al seco de la isla
Tenisca	La Palma (Canarias)	Galería seca	Infiltrar agua regenerada y pluvial para riego
Las Angustias	La Palma (Canarias)	Tratamiento de suelo y acuífero (SAT)	Mejorar la calidad de aguas depuradas y evitar intrusión salina
Masa subterránea ES7GC003	Gran Canaria (Canarias)	Tratamiento de suelo y acuífero (SAT)	Recuperar agua regenerada y mejorar la calidad del acuífero
Furo das Cancelas	Faial (Azores)	Almacenamiento y recuperación de acuíferos (ASR)	Recuperar excedentes de presas para recargar el acuífero
Subcuenca S. Miguel	Santiago (Cabo Verde)	Estanques de infiltración	Recargar y mejorar la calidad de un acuífero usado para riego, afectado por intrusión salina
Chão dos Balcões	Madeira	Estanque de infiltración	Recargar el acuífero con agua de escorrentía

Tabla 1: Distintas Soluciones basadas en la Naturaleza del proyecto GENESIS. Fuente: (GENESIS Project Consortium, 2026).

RESULTADOS PRELIMINARES Y PROYECCIONES

Los resultados del diagnóstico territorial inicial (Santamarta Cerezal et al., 2025) evidencian una elevada vulnerabilidad estructural de los sistemas hídricos insulares frente a las distintas amenazas climáticas. Una parte significativa de las infraestructuras críticas se localiza en áreas expuestas, como las plantas desalinizadoras situadas en franjas costeras potencialmente inundables, así como canales y conducciones en laderas susceptibles a movimientos de tierra, incrementando su probabilidad de afección directa. Además, los impactos indirectos del nexo agua-energía amplifican las perturbaciones al comprometer el suministro hídrico y la disponibilidad energética necesaria para su tratamiento y distribución.

Las SbN implementadas en el marco del proyecto GENESIS buscan reforzar la resiliencia de las infraestructuras convencionales al reducir la presión sobre estas durante eventos extremos y diversificar las fuentes de suministro. Y, a su vez, contrarrestar los procesos de degradación, como la intrusión salina y la reducción de recarga efectiva, mediante la recuperación del agua de escorrentía y de depuradora, creando barreras para evitar dicha intrusión y reduciendo la erosión del suelo. Estas SbN están diseñadas para captar más de 10 hm3 de agua de escorrentía pluvial y aumentar la capacidad de almacenamiento de agua dulce en más de 50 hm3/año, beneficiando a más de 35.000 residentes. A diferencia de otras SbN hídricas orientadas a objetivos específicos, como las zanjas de infiltración para gestionar la escorrentía (Gunnarson et al., 2025), o los humedales artificiales para el tratamiento del agua (Gavit & Satpute, 2025), GENESIS aborda simultáneamente varios retos: recuperar el agua de escorrentía y aguas depuradas, recargar los acuíferos, incrementar el almacenamiento subterráneo y prevenir la contaminación. Mientras iniciativas previas, como los estanques de infiltración, han demostrado la viabilidad de soluciones en contextos continentales (Sharior et al., 2019), GENESIS se centra en las particularidades de las islas volcánicas (fragmentación del medio, heterogeneidad litológica, limitada disponibilidad hídrica), desarrollando nuevas estrategias de gestión adaptativa para reforzar la resiliencia hídrica frente al cambio climático.

CONCLUSIONES

El proyecto GENESIS pone de manifiesto la necesidad de avanzar hacia enfoques integrados de gestión hídrica en sistemas insulares, en los que las infraestructuras grises y las soluciones basadas en la naturaleza no se conciban como elementos alternativos, sino como componentes complementarios de un mismo sistema.

En este sentido, el proyecto busca demostrar la viabilidad de las SbN para fortalecer la resiliencia hídrica en islas volcánicas, configurándose como una base experimental y replicable para el desarrollo de modelos que contribuyan a la seguridad hídrica en un contexto de creciente incertidumbre climática.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue parcialmente financiada por el programa HORIZON-MISS-2023-CLIMA-01-02 a través del proyecto “Geologically Enhanced NaturE-based Solutions for climate change resiliency of critical water InfraStructure (GENESIS)”, Acuerdo de Subvención nº 101157447.

REFERENCIAS

Cruz-Pérez, N., Rodrígez-Alcántara, J. S., Clavijo-Núñez, S., Paradinas-Blázquez, C., & Santamarta, J. C. (2025). Climate Projections and Temperature Evolution in the Canary Islands: High Resolution Analysis at Island Scale. *International Journal of Climatology*. https://doi.org/https://doi.org/10.1002/joc.70139

Gavit, D., & Satpute, S. (2025). *Optimizing Constructed Wetlands: A Sustainable Nature-Based Solution for Effective Wastewater Treatment*. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.12893.32486

GENESIS Project Consortium. (s. f.). *GENESIS – Innovating Water Infrastructures for a Sustainable Future*. GENESIS. Recuperado el 23 de abril de 2026, de https://genesisnbs.eu/

Gunnarson, M., Barquet, K., & Le Rouzo, A. (2025). *Nature-based solutions in municipal stormwater management in Sweden: Costs, co-benefits, responsibilities and policies* (SEI Report). Stockholm Environment Institute. https://doi.org/10.51414/sei2025.002

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2023). *Climate Change 2023. Synthesis Report. Summary for Policymakers.* (AR6 Synthesis Report). https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_SPM.pdf

International Union for Conservation of Nature. (2020). *Estándar Global de la UICN para soluciones basadas en la naturaleza: Primera edición*. IUCN. https://doi.org/https://doi.org/10.2305/iucn.ch.2020.08.es

Reyes Parrilla, D. (2025). *GENESIS_D1.1_Analysed historical climate data and projections for the region*. https://doi.org/10.5281/zenodo.17492714

Santamarta Cerezal, J. C., Koritnik, J., Cruz Pérez, N., & Expósito Brazier, M. (2025). *D1.3 Critical water infrastructure's vulnerability and weaknesses assessment report*. https://doi.org/10.5281/zenodo.17491717

Santamarta, J. C., Rodríguez-Martín, J., Poncela, R., Fontes, J. C., Lobo De Pina, A., & Cruz-Pérez, N. (2022). Integrated Water Resource Management in the Macaronesia. *International Review of Civil Engineering (IRECE)*, *13*(4), 290. https://doi.org/10.15866/irece.v13i4.21523

Sharior, S., McDonald, W., & Parolari, A. J. (2019). Improved reliability of stormwater detention basin performance through water quality data-informed real-time control. *Journal of Hydrology*, *573*, 422-431. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.03.012

Singhvi, A., Luijendijk, A. P., & van Oudenhoven, A. P. E. (2022). The grey – green spectrum: A review of coastal protection interventions. *Journal of Environmental Management*, *311*(1), 114824. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114824

LAS PISCINAS OCEÁNICAS: ELEMENTOS DE ADAPTACIÓN COSTERA MULTIFUNCIONALES EN UN CONTEXTO DE CAMBIO CLIMÁTICO

Nareme HERRERA LÓPEZ[1], Francisco GARCÍA SÁNCHEZ[2], Cecilia RIBALAYGUA BATALLA[2]

[1]*Escuela de Doctorado (EDUC). Universidad de Cantabria*
[2] *Dpto. de Geografía, Urbanismo y Ordenación del Territorio. U. de Cantabria*

nareme.herrera@alumnos.unican.es , franciscojose.garcia@unican.es
cecilia.ribalaygua@unican.es

RESUMEN

Las piscinas marinas u oceánicas son infraestructuras azules intermareales que, más allá de su origen vinculado al ocio y la salud, se constituyen como soluciones híbridas para la adaptación costera. En un contexto de cambio global, estos espacios tienen una naturaleza dicotómica: actúan como dinamizadores socioeconómicos y, paralelamente, como potenciales estructuras de protección frente a la subida del nivel del mar. Este estudio realiza un análisis comparativo de 90 piscinas marinas en el litoral canario para evaluar su potencial frente al cambio climático. La investigación se estructura en tres fases integrando herramientas SIG, técnicas de fotointerpretación y cartografía histórica con el inventariado y caracterización tipológica de la costa e identificación del potencial adaptativo. Los resultados revelan que solo el 15,55 % de las piscinas marinas de Canarias poseen actualmente potencial adaptativo. Se concluye además que la baja capacidad adaptativa del resto de piscinas responde a factores relativos al diseño, la falta de conectividad funcional con el frente urbano, cuya corrección estratégica e implementación de soluciones de eco-ingeniería podrían consolidar estas estructuras como herramientas complementarias para la gestión resiliente del litoral.

Palabras clave: Adaptación costera, cambio climático, infraestructuras azules, piscinas marinas

ABSTRACT

Sea or ocean pools are intertidal blue infrastructures that, beyond their origins linked to leisure and health, serve as hybrid solutions for coastal adaptation. In the context of global change, these spaces have a dual nature: they act as socioeconomic catalysts and, at the same time, as potential protective structures against rising sea levels and storm surges. This study conducts a comparative analysis of 90 sea pools along the Canary Islands coastline to assess their potential in the face of climate change. The

research is structured in three phases, integrating GIS tools, photointerpretation techniques, and historical cartography, along with the inventory and typological characterization of the coastline and the identification of adaptive potential. The results reveal that only 15.55% of the sea pools in the Canary Islands currently possess adaptive potential. It is further concluded that the low adaptive capacity of the remaining pools responds to factors related to design and the lack of functional connectivity with the urban front; strategic correction of these issues and the implementation of eco-engineering solutions could consolidate these structures as complementary tools for resilient coastal management.

Key words: Blue infrastructure, climate change, coastal adaptation, sea pools

INTRODUCCIÓN

En un contexto de cambio climático, el aumento del nivel del mar y la intensificación de los fenómenos costeros adversos, se constituyen como algunos de los principales peligros a los que se exponen las regiones costeras del mundo. Según las tendencias proyectadas en el último informe del IPCC (2022), bajo un escenario de altas emisiones (SSP5-8.5), el nivel promedio del nivel del mar podría incrementarse entre 25 cm en 2050 hasta 1,50 metros en 2150, lo que implicaría la inundación de muchas zonas litorales y la afectación crítica de ecosistemas, asentamientos humanos e infraestructuras costeras ubicadas en esta franja. Este ascenso progresivo del nivel del mar se ve acompañado por un aumento en la frecuencia e intensidad de los eventos extremos asociados al oleaje, las tormentas y las marejadas.

Fenómenos que actualmente son ocasionales, serán más frecuentes en la mayoría de los escenarios a final de siglo (Oppenheimer et al., 2019). Estos cambios en los patrones del oleaje pueden agravar la vulnerabilidad costera de comunidades e infraestructuras (Casas-Prat et al., 2024). El impacto en las costas sería muy elevado donde vive gran parte de la población mundial (Ruan et al., 2024) y, especialmente en contextos insulares, donde la población se concentra en la costa, como es el archipiélago canario (fig. 1).

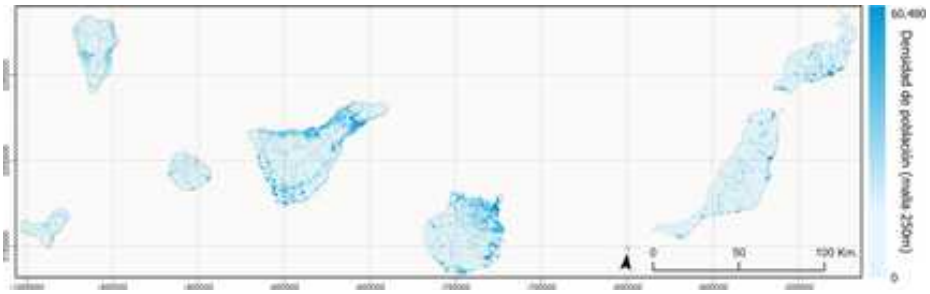


Figura 1. Malla de densidad (250m) de población de Canarias. Fuente: elaboración propia a partir de datos de ISTAC (2022).

Dentro de las medidas de adaptación, las piscinas marinas, pueden posicionarse como soluciones de menor impacto en el territorio y de media-alta efectividad en la reducción del riesgo. Las piscinas marinas son infraestructuras situadas en zonas intermareales que podrían constituirse como soluciones híbridas de adaptación, al tener un gran potencial para la mejora de la resiliencia costera. Estas infraestructuras están históricamente asociadas a transformaciones vinculadas al ocio y el turismo. A partir del S.XVIII, cuando la costa se revaloriza socialmente, el mar se pone de moda en Europa (Williams, 2010), especialmente por el interés que el litoral tenía por sus beneficios sobre la salud ya apuntadas por diversas figuras médicas y recomendaciones de la época (Romer-Lee, 2023). En este proceso de revalorización se comienzan a construir infraestructuras costeras como las piscinas marinas, especialmente aprovechando la geomorfología litoral para crear espacios seguros y atractivos para el baño mediante muros, excavaciones y otras intervenciones sobre el litoral (Sáenz, 2017). Asimismo, los avances tecnológicos en los materiales y diseños implementados para la promoción de la biodiversidad en ámbitos costeros (Ido & Shimrit, 2015), han propiciado que las piscinas marinas vuelvan a ser consideradas como infraestructuras viables para su integración en los frentes marítimos, con un potencial multifuncional que abarca desde el bienestar humano y la promoción de la biodiversidad hasta su reconocimiento como medidas de adaptación costera al cambio climático (IH Cantabria, 2023; COSTAdapta, 2025).

Pese a estas potencialidades multifuncionales, la caracterización de las piscinas marinas y la evaluación de su capacidad como medida de adaptación al cambio climático no ha sido evaluada sistemáticamente. De esta forma, el presente estudio aborda esta carencia identificando y caracterizando este tipo de infraestructura y explorando el potencial de adaptación en el litoral canario, en línea con los objetivos del proyecto LIFE COSTAdapta, que promueve el uso de soluciones híbridas para la resiliencia del litoral canario.

METODOLOGÍA

La investigación se basa en un enfoque multiescalar que integra fotointerpretación de imágenes de alta resolución, análisis SIG y revisión de cartografía histórica. Tras la identificación y caracterización de las 90 piscinas inventariadas en el archipiélago canario, se aplicó una evaluación multicriterio para determinar su potencial de adaptación y protección.

Este potencial se define como la capacidad de la infraestructura para actuar como barrera física, reduciendo la exposición de inmuebles residenciales y equipamientos e infraestructuras ante el oleaje y la erosión, basado en un análisis de conectividad y continuidad espacial estructurado en tres niveles: (1) Análisis estructural y de entorno: Mediante ortofotografías de máxima resolución, histórica y Google Street View, se

delimita la lámina de agua, el diseño de la piscina y se identifica la presencia de elementos vulnerables en el radio de influencia directa de aquella; (2) Análisis de conectividad física: Se analiza la continuidad/conectividad física entre la piscina y las viviendas e infraestructuras identificadas. Se considera que hay discontinuidad— que anula el potencial de protección— cuando se observa: (I) un desnivel topográfico abrupto (pendiente pronunciada o diferencia de altura significativa), o (II) la presencia de una estructura lineal continua e infranqueable (ej: paseo marítimo elevado, malecón o un muro) que se interponga entre la piscina y las viviendas, inhibiendo este potencial de protección; (3) Integración de estructuras complementarias: Se identifica si la piscina cuenta con elementos de protección asociados (escolleras o diques) que refuercen su papel como barrera.

En función de los criterios anteriores, el potencial se define en tres categorías; existencia de continuidad física y protección de la totalidad de las viviendas e infraestructuras en su área de influencia; protección parcial debido a fragmentación en el diseño o discontinuidades topográficas; inexistencia de protección debido a la morfología o la falta de conectividad que impide una función de defensa.

RESULTADOS

Tras el análisis sistemático de las 90 piscinas marinas inventariadas y la aplicación del análisis de potencialidad de adaptación al cambio climático los principales hallazgos muestran que: El 15,55% de las piscinas marinas canarias tienen potencial como infraestructuras de adaptación al cambio climático en el frente costero (Fig. 2a – 2b); la mayor parte de esta se localizan en Gran Canaria (5,55%) y Lanzarote (4,44%); el 28,57% de las piscinas marinas con potencial adaptativo se sitúan en un área natural protegida o en el entorno próximo a este (<200m); entre las características principales de estas piscinas se identifica que generalmente tienen una posición avanzada (64,28%) —ganan espacio respecto a la línea de costa original— ; el 28,57% integran elementos de protección como escolleras y diques; y de promedio tienen un nivel de intervención moderado (57,14%).

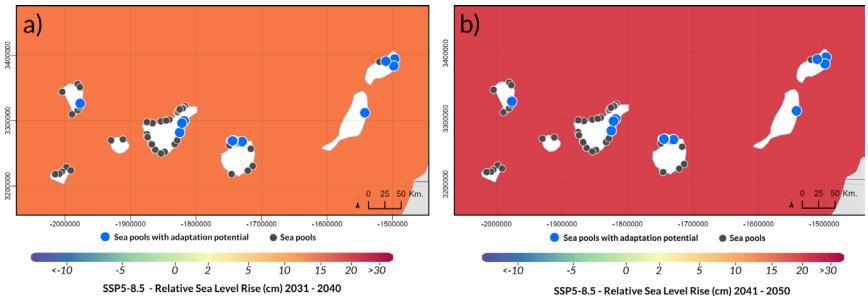


Figura 2. Aumento del nivel del mar relativo bajo un escenario SSP5-8.5: (a) escenario proyectado a 2031 – 2040; (b) escenario proyectado a 2041 - 2050. Fuente: Elaboración propia a partir de Copernicus Climate Change Service.

Igualmente, se identifica que, frente a fenómenos como el aumento del nivel del mar que ya afecta a gran parte de estas estructuras, las proyecciones indican que este patrimonio costero podría verse gravemente afectado en un futuro cercano, especialmente bajo un escenario SSP5-8.5 (Fig. 2a-2b).

DISCUSIÓN

Los resultados muestran que las piscinas marinas, si bien en su mayoría son infraestructuras de carácter híbrido intrínsecamente, muchas de ellas no tienen capacidad adaptativa, este potencial depende de factores como su inserción territorial, su estado de conservación, diseño, su conectividad con el frente urbano y la integración de estructuras de defensa. En este sentido se han identificado cinco factores principales que limitan la resiliencia de estas infraestructuras:

- Antigüedad y diseño: La mayoría de las piscinas (1980s) fueron calculadas para niveles medios del mar inferiores a los actuales y con otros fines que excluían la adaptación a fenómenos costeros.
- Falta de conectividad: En muchos casos, la piscina está integrada en la geoforma costera o sobre un frente urbano, pero no tiene continuidad sobre el entorno, anulando su potencial de protección.
- Intervención y materialidad: Una gran cantidad de piscinas no integra actuaciones que vayan más allá del baño, así como el uso de materiales que en ocasiones perjudica la biodiversidad marina.
- Falta de medidas adaptativas y estructuras de defensa: Pocas piscinas con capacidad de protección integran además parcialmente estructuras de defensa que complementan al muro principal, añadiendo una protección extra al ámbito puntual donde se ubican.
- Afecciones humanas: El uso continuado y no controlado de estos espacios suponen impactos potenciales sobre la biodiversidad marina por factores como la pisada del espacio intermareal.

Por otra parte, las piscinas marinas carecen en la actualidad de directrices generales para su constitución como infraestructuras de adaptación climática. Si bien existen recomendaciones técnicas orientadas a asegurar la integridad estructural y la estabilidad de la costa, estas suelen centrarse en aspectos puntuales como la forma de los "vasos" o el tipo de sustrato.

En este contexto, a partir del análisis realizado, así como los avances tecnológicos y evaluación de los riesgos en el frente costero, se sugiere que una intervención estratégica podría elevar ese 15,55% de potencial adaptativo a niveles significativamente mayores. Propuestas como la integración de soluciones tipo ‘’living sea walls’’ o el uso de morteros ‘’verdes’’ en los muros no solo favorecerían a la biodiversidad, sino que aumentarían aspectos como la rugosidad del muro, mejorando

la disipación del oleaje. Otras estrategias como la adaptación del diseño y las cotas de los muros de las piscinas se presentan como alternativas plausibles con un impacto positivo en determinados contextos frente a actuaciones más ‘’duras’’, proporcionando no solo una protección frente a la inundación costera y aumento del nivel del mar sino dotando de mayor seguridad el uso recreativo de las piscinas marinas.

CONCLUSIONES

Los resultados indican que las piscinas marinas, más allá de sus co-beneficios socioculturales y ambientales, poseen un valor estratégico para la resiliencia costera, aunque su eficacia actual está críticamente condicionada. En la actualidad, el potencial adaptativo es limitado y solo el 15,55% del inventario canario tiene cierta capacidad para actuar como una barrera física predominando las funciones recreativas sobre las de protección. Asimismo, los resultados sugieren que para que estos espacios azules trasciendan el ámbito tradicional recreativo, es necesario el rediseño morfológico y la integración de soluciones de eco-ingeniería. Estas intervenciones permitirían transformar las piscinas en infraestructuras híbridas multifuncionales, conciliando la protección del litoral con el fomento de la biodiversidad y el bienestar humano. Aspectos que están siendo abordados de forma piloto por el proyecto LIFE COSTAdapta, en un marco de revalorización de estas infraestructuras litorales como medidas de adaptación frente al cambio climático y la gestión resiliente del litoral.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha recibido financiación del Programa LIFE de la Comisión Europea, con referencia LIFE22-CCA-ES-LIFE-COSTAdapta/101113851.

REFERENCIAS

Casas-Prat, M., Hemer, M., Dodet, G., Morim, J., Wang, X. L., Mori, N., Young, I., Erikson, L., Kamranzad, B., Kumar, P., Menéndez, M., Feng, Y. (2024). Wind – wave climate changes and their impacts. *Nature Reviews Earth & Environment*, 5 (1), 23-42. https://doi.org/10.1038/s43017-023-00502-0.

COSTAdapta (2025). Integrated diagnosis report (D2.3). Programa LIFE Climate Action (LIFE-2022-SAP-CLIMA).

Grellier, J., White, M., Albin, M., Bell, S., Elliott, L., Gascón, M., Gualdi, S., Mancini, L., Nieuwenhuijsen, M. J., Sarigiannis, D. A., van den Bosch, M., Wolf, T., Wuijts, S., & Fleming, L. (2017). BlueHealth: A study programme protocol for mapping and quantifying the potential benefits to public health and well-being from Europe’s blue spaces. *BMJ Open*, 7(6). https://doi.org/10.1136/bmjopen-2017-016188

IHCantabria (2023). *Catálogo de Medidas de Adaptación a los efectos del Cambio Climático en el litoral*. LIFE18 CCA/ES/001160 “Adaptation to climate change through management and restoration of European estuarine ecosystems”.

Ido, S., & Shimrit, P. F. (2015). Blue is the new green - Ecological enhancement of concrete based coastal and marine infrastructure. *Ecological Engineering*, 84. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.09.016

Oppenheimer, M., Glavovic, B. C., Hinkel, J., van de Wal, R., Magnan, A. K., Abd-Elgawad, A., Cai, R., Cifuentes-Jara, M., DeConto, R. M., Ghosh, T., Hay, J., Isla, F., Marzeion, B., Meyssignac, B., & Sebesvari, Z. (2019). “Sea level rise and implications for low-lying islands, coasts and communities”. In: H.-O. Pörtner, et al. (Eds.), *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*. Cambridge University Press. https://www.ipcc.ch/srocc/

Romer-Lee, C. (2023). *Sea pools: 66 saltwater sanctuaries from around the world*. Batsford Books. 192 pp.
Sáenz, C. B. (2017). “La expansión urbanística en entornos turísticos costeros: Piscinas naturales en Canarias y Madeira”. In: E. Acosta Guerrero (Coord.), *XXII Coloquio de Historia Canario-Americana: las ciudades del mundo Atlántico. Pasado, presente y futuro*. (p. 86). Cabildo Insular de Gran Canaria.

Ruan, X., Sun, H., Shou, W., & Wang, J. (2024). The Impact of Climate Change and Urbanization on Compound Flood Risks in Coastal Areas: A Comprehensive *Review of Methods. Applied Sciences*, 14(21), 10019. https://doi.org/10.3390/app142110019

Williams, D. M. (2010). Humankind and the Sea: The Changing Relationship since the Mid-Eighteenth Century. *International Journal of Maritime History*, 22(1), 1-14. https://doi.org/10.1177/084387141002200103

AGUA SUBTERRÁNEA, CAMBIO CLIMÁTICO Y SOLUCIONES DE INGENIERÍA INNOVADORAS EN UNA ISLA VOLCÁNICA: EL CASO DE LA PALMA EN LOS PROYECTOS BIO-JUST Y GENESIS

José Antonio BATISTA-MEDINA[1], Iván HERNÁNDEZ-RÍOS[2], Noelia GARCÍA-RODRÍGUEZ[3]

[1] *ISTUR – Universidad de La Laguna*
[2] *Asociación para la Investigación de la Macaronesia (AIM)*
[3] *Instituto Mixto de Investigación en Biodiversidad – CSIC*

jbatisme@ull.edu.es, director@aimacaronesia.eu, noelia.garcia.r@csic.es

RESUMEN

En esta comunicación se presenta una solución de ingeniería basada en la naturaleza que se está implementando en La Palma para hacer frente a problemas asociados a la explotación y uso del agua subterránea, así como a los retos del cambio climático: los denominados cierres hidráulicos de galerías de agua. Hasta la fecha, los resultados son positivos, si bien su número sigue siendo reducido. Para incrementar su implantación, hay que superar obstáculos materiales e inmateriales de diversa índole.

Palabras clave: agua subterránea, cambio climático, SbN, cierres hidráulicos, La Palma.

ABSTRACT

In this article, we present a nature-based engineering solution currently being implemented on the island of La Palma to address issues related to the exploitation and use of groundwater, as well as the challenges posed by climate change: hydraulic closures in water galleries. So far, the results have been positive, but the number of such closures remains limited. To increase their implementation, it is necessary to overcome both tangible and intangible barriers.

Key words: groundwater, climate change, NbS, hydraulic closures, La Palma.

INTRODUCCIÓN

Las islas volcánicas se caracterizan por su elevada dependencia del agua subterránea, que constituye su principal fuente de recursos hídricos (Santamarta et al., 2014). En estos territorios, los acuíferos se recargan de forma natural mediante las precipitaciones, lo que los convierte en sistemas muy condicionados por el régimen

pluviométrico y altamente sensibles a los efectos del cambio climático. A diferencia de los espacios continentales, en ellas las posibilidades de intervención en procesos críticos, como la recarga, son limitadas, a lo que se añade la imposibilidad de recurrir a soluciones habituales en contextos continentales (p. ej., trasvases entre cuencas o grandes infraestructuras).

Esto caracteriza a las islas como sistemas hídricos independientes y autosuficientes que deben desarrollar estrategias de gestión propias para hacer frente a las demandas hídricas en un contexto de riesgos y desafíos asociados al cambio climático. En esta comunicación se presenta, desde la perspectiva socioambiental del proyecto BIO-JUST (BIOdiversity and ecosystem protection driven by environmental JUSTice) e hidrogeológica del proyecto GENESIS (Geologically Enhanced NaturE-based Solutions for climate change resiliency of critical water InfraStructure) (García-Gil et al., 2024), una medida que se está implementando en la isla de La Palma (Islas Canarias, España) para abordar algunos de los problemas asociados a la extracción de agua subterránea mediante galerías y hacer frente a los efectos del cambio climático: los cierres hidráulicos (llamados “tranques”) instalados en estas para el control del flujo hídrico. Si bien presentan algunas particularidades, estos cierres pueden incluirse en la denominada tecnología de presas o diques subterráneos, usada en diferentes lugares del mundo para favorecer una explotación sostenible de los recursos hídricos subterráneos (Onder y Yilmaz, 2005). Se trata de una solución basada en la naturaleza (SbN) que ha demostrado ser eficaz desde el punto de vista ambiental y económico, pero que, en el presente caso, se enfrenta a factores limitantes de diverso tipo (estudiados en BIO-JUST) que frenan su implantación.

CASO DE ESTUDIO: LA PALMA

Dentro del contexto canario, La Palma puede considerarse, con sus 708,32 km², una isla de tamaño medio. Su población es de 86.194 habitantes (2025). La economía gira en torno a la agricultura (el plátano es el principal cultivo) y al turismo, que aún se encuentra en pleno desarrollo y se basa en un modelo de naturaleza y rural. Un indicador del peso del sector primario es el consumo de agua: el 82,03% en el año 2022 (CIALP, 2024: 146).

Después de la mitad del siglo pasado, el agua disponible en la isla ha provenido, en su mayor parte, de galerías (32,6 hm3 de 45,7 hm3 en 2022, el 71,34% [CIALP, 2024: 223]), seguida de la proporcionada por los pozos (7,9 hm3, el 17,29%) y, finalmente, por los manantiales (5,3 hm3, el 11,60%). Este bien natural es, en su mayor parte, privado y se gestiona a nivel local por organizaciones de propietarios y usuarios, destacando las “comunidades de aguas”. El Consejo Insular de Aguas es la administración pública hidráulica encargada de la política hídrica de la isla.

METODOLOGÍA

Las metodologías empleadas para analizar los cierres hidráulicos desde los proyectos BIO-JUST y GENESIS son distintas debido a sus diferentes perspectivas analíticas (socioambiental e hidrogeológica, respectivamente). El primero se ha basado en una investigación de carácter etnográfico desarrollada en La Palma durante los años 2024 y 2025 en la que se han empleado varias técnicas de investigación, sobre todo cualitativas. L

a información primaria ha provenido de (1) entrevistas semidirigidas (más de 60) a distintos agentes, (2) innumerables conversaciones informales, (3) observación y observación participante, (4) grupos de discusión (con GENESIS), y (5) una encuesta a la población de la isla. A ello hay que añadir la información cuantitativa y cualitativa procedente de fuentes secundarias publicadas (libros, artículos, medios de comunicación, etc.) y no publicadas (informes, estudios, planes hidrológicos, proyectos técnicos, etc.).

Por su parte, el proyecto GENESIS se basa en el estudio científico-técnico de 2 galerías como demostradores reales (DM2 Barlovento y DM3 Trasvase), empleando para ello (1) prospección, identificación y análisis de requerimientos de comunidades locales y partes interesadas, (2) evaluación de potenciales localizaciones para galerías con cierre hidráulico, (3) estudios hidrogeológicos y asistencia técnica en las localizaciones, (4) diseño, implementación y operación real de los demostradores, y (5) despliegue de herramientas de monitorización y digitales, (6) actividades de participación social de comunidades locales, (7) evaluación de rendimiento de las demostraciones mediante modelización matemática, y (8) análisis de resultados, difusión y replicabilidad de las SbN en la Macaronesia y otras regiones.

EL PROBLEMA Y LA SOLUCIÓN DE LOS CIERRES HIDRÁULICOS

Pese a que el balance hidrológico insular indica que la recarga del sistema acuífero resultante de las precipitaciones es superior a los recursos hídricos disponibles a través de manantiales, galerías y pozos (CIALP, 2024: 223), hay problemas puntuales y locales debido a la explotación intensiva de algunas zonas y a la distribución desigual de las lluvias y de la recarga entre las regiones de la isla.

Si nos centramos en las galerías, comprobamos que el agua suministrada ha disminuido en los últimos años como resultado, por un lado, de la reducción drástica de los trabajos de perforación y reperforación y, por otro, de largos ciclos de años secos en las últimas décadas y de la consiguiente disminución de la recarga natural (Figura 1).

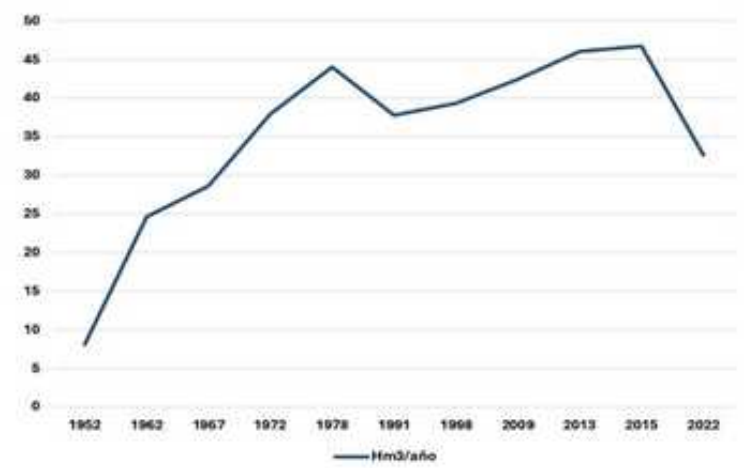


Figura 1. Evolución del agua procedente de galerías. Varias fuentes. E.P.

Como problema ambiental y económico, al que se ha prestado especial atención en BIO-JUST, el número de manantiales productivos ha disminuido notablemente, a lo que se suma la pérdida de caudal de los que se mantienen. Hemos de tener presente que las galerías suponen salidas adicionales del sistema acuífero insular que, en ausencia de mecanismos de regulación, proporcionan agua continuamente, drenando el acuífero.

Los indicadores de cambio climático en La Palma complican la situación descrita (véase CIALP, 2024: 63 y ss.), por lo que es necesario implementar medidas para conseguir una explotación y un uso eficientes y sostenibles del agua subterránea y responder de manera resiliente ante ese desafiante escenario climático.

Entre ellas tenemos los cierres hidráulicos instalados en el interior de las galerías, que reconstruyen los diques volcánicos perforados (Rodríguez Alcántara et al., 2024). Consisten, en su versión más básica, en un muro sólido (habitualmente con una puerta que permite el acceso al resto de la galería), una o varias tuberías de toma de salida con sus correspondientes válvulas y un medidor de presión (Figura 2). En las épocas de lluvia, la galería puede cerrarse, de modo que esta y el propio acuífero actúan como reservorio subterráneo del agua que no se requiere. En este sentido, los cierres posibilitan, a corto plazo, una gestión racional y sostenible del recurso hídrico subterráneo, mejoran su regulación y su disponibilidad. A medio-largo plazo, esta medida técnica podría incrementar el volumen de recursos hídricos subterráneos a nivel insular (incluyendo los proporcionados por los manantiales) y ofrecer una respuesta resiliente a los efectos del cambio climático.



Figura 2. Cierre hidráulico ("tranque"). Fuente: BIO-JUST

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Aunque no existe una evaluación sistemática de los cierres instalados en la isla, la información recabada durante el trabajo de campo en ambos proyectos evidencia sus notables beneficios (a corto plazo). El control de los caudales que se extraen de las galerías mejora su disponibilidad durante los periodos de uso y, en general, permite una utilización más racional de la obtenida a través de ellas, que se gestiona "a la demanda". Sin embargo, el nivel de implantación de esta solución técnica, aunque ha mejorado en los últimos años, continúa siendo limitado: en octubre de 2025 había 22 galerías dotadas de cierres (alrededor del 25% de las operativas), aunque solo estaban funcionando en unas 18.

La investigación desarrollada en el marco de BIO-JUST registra varios factores limitantes de muy diferente tipo, algunos de largo desarrollo histórico. Entre los identificados destacan la concepción del agua como recurso principalmente económico o productivo, su propiedad privada y su asignación a través del mercado, la limitada consideración de las cuestiones ambientales en la gestión del agua, algunos obstáculos legales a la actuación del Consejo Insular de Aguas, los elevados costes de la solución, su inviabilidad en algunos casos por razones hidrogeológicas, etc. Estos factores (si bien no operan necesariamente en todos los casos) frenan la introducción de esta medida técnica en una mayor cantidad de galerías y, por consiguiente, sus resultados, especialmente en términos económicos y ambientales. Para mejorar dichos resultados y tener un mayor alcance a escala insular sería necesario incrementar su número, al menos hasta el 50-60% planteado en su momento por el Consejo Insular de Aguas La Palma, lo que implicaría duplicar las galerías con cierres hidráulicos. Consideramos que la demostración técnica en entornos reales durante el desarrollo del proyecto GENESIS permitirá fomentar la

replicación de esta SbN en la isla y en otras regiones. La investigación realizada pone de manifiesto la relevancia de la perspectiva social en el análisis de las SbN, por lo general descuidada. Frente a ello, BIO-JUST y GENESIS ponen de manifiesto la oportunidad y la necesidad de integrar los enfoques social y técnico en la búsqueda de soluciones innovadoras a los desafíos hídricos actuales y futuros. Estos no solo no son incompatibles, sino que resultan indispensables para diseñar, implementar de manera exitosa y evaluar tales soluciones de ingeniería. Se trata, en otros términos, de no obviar el factor humano implicado en las SbN.

CONCLUSIONES

El estudio de los cierres hidráulicos instalados en las galerías de agua de La Palma indica que se trata de una solución técnica eficaz, eficiente y sostenible, que aporta resiliencia frente a los efectos del cambio climático gracias al uso del propio sistema acuífero como reservorio natural. Los beneficios de esta SbN serán mayores si aumenta su nivel de implantación, para lo que hay que continuar la investigación y, en otro plano, afrontar las limitaciones de distinta índole (identificadas en BIO-JUST) a las que se enfrenta.

REFERENCIAS

CIALP. 2024. *Plan Hidrológico de La Palma. Ciclo de planificación hidrológica 2021-2027. Memoria*. Santa Cruz de La Palma, Consejo Insular de Aguas de La Palma. Octubre 2024.

García-Gil, A., Rodríguez-Alcántara, J.S., Cruz-Pérez, N., Marazuela, M.A., Jiménez, J., Baquedano, C., Martínez-León, J., Gasco Cavero, S., Rodríguez-Martín, J. y Santamarta, J.C. 2024. “El proyecto GENESIS: desafíos y adaptación del sector hídrico en pequeñas islas de la Macaronesia frente al cambio climático”. *InGEOpres*, 311 (5): 28-32.

Onder, H. y Yilmaz, M. (2005). “Underground Dams. A Tool of Sustainable Development and Management of Groundwater Resources”. *European Water*, 11/12: 35-45.

Santamarta, J.C., Lario-Bascones, R. J., Rodríguez-Martín, J., Hernández-Gutiérrez, L. E. y Poncela, R. (2014). “Introduction to Hydrology of Volcanic Islands”. *IERI Procedia*, 9: 135-140.

Rodríguez-Alcántara, J.S., Santamarta Cerezal, J.C., Cruz-Pérez, N.C., Rodríguez-Martín, J., Marazuela Calvo, M.A. y García-Gil, A. (2024) “Regulación de caudales de agua subterráneos en acuíferos de islas volcánicas mediante cierres hidráulicos aprovechando los diques geológicos”. *InGEOpres*, 312 (6): 78-83.

SOCIAL VULNERABILITY TO URBAN FLOODING IN SANTA CRUZ DE TENERIFE: A MULTI-SCALE, MULTIVARIATE APPROACH

María JIMÉNEZ-MEJÍAS[1], Abel LÓPEZ-DÍEZ[1], Jaime DÍAZ-PACHECO[1], Yeray HERNÁNDEZ-GONZÁLEZ[2], Nerea MARTÍN-RAYA[1], Pedro DORTA ANTEQUERA[1], Tamara FEBLES ARÉVALO[3] and Jordan CORREA[1]

[1] *Chair of Disaster Risk Reduction and Resilient Cities and Research Group on Spatial Planning and Risks (GEORIESGOS), University of La Laguna (ULL), San Cristóbal de La Laguna, Spain*
[2] *Department of Applied Economics and Quantitative Methods, University of La Laguna (ULL), San Cristóbal de La Laguna, Spain*
[3] *Department of Art, City and Territory, University of Las Palmas de Gran Canaria (ULPGC), Gran Canaria, Las Palmas de Gran Canaria, Spain;*

mjimenem@ull.edu.es; alopezd@ull.edu.es; jdiazpac@ull.edu.es; nmartinr@ull.edu.es; pdorta@ull.edu.es; jcorreag@ull.edu.es; yhergonz@ull.edu.es; tamara.febles@ulpgc.es

ABSTRACT

Over recent decades, rapid population growth and urbanisation, often accompanied by inappropriate land-use planning and modifications to drainage networks, together with the effects of climate change, have been identified among the leading causes of increasing losses from flood hazards. However, the damage caused by a single flood event does not affect the entire population equally. In this context, social vulnerability plays a key role in determining differences in exposure, sensitivity, and coping and recovery capacity, since social and economic factors broadly influence both the magnitude of the risk and the severity of its impacts.

Therefore, the main objective of this study is to assess and map social vulnerability to flooding in the municipality of Santa Cruz de Tenerife (Canary Islands, Spain), where previous flood events (e.g., in 2002 and 2010) caused major economic losses and even loss of life, highlighting the municipality's susceptibility to this natural hazard. Various approaches, such as Social Vulnerability Indices (SVIs), have been developed to assess the social, economic, and institutional factors that could amplify impacts across populations.

However, capturing spatial differences in social vulnerability remains difficult because vulnerability patterns are strongly shaped by the specificities of each geographic context. Consequently, this study combines a two-scale analytical approach based on census tracts and a regular 250 × 250 m grid with multivariate statistical techniques, including Shannon entropy weighting, PCA, and k-means clustering. Preliminary results show that the highest levels of vulnerability are concentrated in the

municipality's north-eastern sector, followed by parts of the south-eastern belt and several areas within the central urban zone.

Keywords: flash flooding, urban resilience, adaptation, Canary Islands.

INTRODUCTION

Floods are among the most damaging natural hazards globally and remain the leading cause of weather-related fatalities. Indeed, climate change has been associated with increasing flood frequency and severity in many regions (e.g., Tabari, 2020), which, together with the complex sociodemographic structures and spatial inequalities, strongly shape the impacts of extreme hydrometeorological events. In particular, urban areas have become increasingly hazardous due to rapid population growth, urbanisation and the resulting extensive soil sealing, typically coupled with inadequate land-use planning. This is the case of the municipality of Santa Cruz de Tenerife (Canary Islands, Spain), characterised by a Mediterranean semi-arid climate with low but highly irregular annual precipitation, often concentrated in short, intense rainfall events. When combined with steep, ravine-dominated orography, these short-duration episodes may trigger flash flooding, as evidenced by past events in 2002 and 2010.

In risk analysis, hazard denotes a potentially damaging physical process, whereas vulnerability refers to the social conditions that make people and places more or less susceptible to harm (e.g., Navarro et al., 2020).In this sense, social vulnerability refers to the set of demographic, socio-economic, and infrastructural conditions that shape a population's ability to anticipate, withstand, cope with, and recover from the impacts of hazardous events (Cutter, 2003). It is therefore essential to explain why, under comparable physical forcing, flood impacts are not evenly distributed across space or social groups.

METHODS

To assess social vulnerability to flooding in Santa Cruz de Tenerife, we applied a two-scale analytical approach using (i) census tracts and (ii) a regular 250 x 250 m grid. Although census tracts provide detailed socio-economic information, their varying spatial size may conceal important local differences, especially in peripheral and rural areas. For this reason, the regular grid was incorporated to better represent fine-scale spatial variability in social vulnerability. We compiled disaggregated 2022 indicators for 164 census tracts from the Spanish National Statistics Institute (INE) and 477 grid cells from the Canary Islands Statistics Institute (ISTAC). These data were complemented with GIS information on land use, schools, healthcare facilities, and flood-hazard modelling (Martín-Raya et al., 2024). Social vulnerability indices (SVIs) were computed using two different methods: a principal component analysis (PCA) workflow organised

into three thematic dimensions (demography, socio-economic and infrastructure), and a Shannon-entropy weighting approach structured along exposure, sensitivity, and adaptive capacity. As in index-based flood-vulnerability studies, we first screened the candidate set for conceptual overlap with the literature and for operational redundancy using bivariate correlation analysis. Therefore, the initial dataset (>100 variables) was reduced to a compact set of approximately 17–24 indicators, which constitute the final inputs used in the PCA- and entropy-based vulnerability indices. For both methods, indicators were coded for vulnerability direction (positive or negative contribution) and aligned so that, once oriented, greater values imply greater vulnerability, which maintains internal consistency in the aggregation into dimensional sub-indices and the global SVI. Before running PCA, we checked whether the correlation matrix was suitable for factor analysis using Kaiser–Meyer–Olkin (KMO) and Bartlett's test of sphericity (e.g., Navarro et al., 2020). We then extracted components using varimax rotation and retained them using a cumulative explained variance cut-off. From these components, dimension-level scores and an overall SVI were obtained (e.g., Roldán-Valcarce et al.,2023). Additionally, k-means clustering was applied to the first three component scores (PC1–PC3) to group tracts with similar multivariate signatures, thereby summarising joint vulnerability patterns. For the entropy method (e.g., Lianxiao & Morimoto, 2019; Thanh Dang et al., 2023), we first transformed every indicator in a block on a [0, 1] scale with min–max normalisation. Subsequent data-driven weights were derived as a function of the spread of each indicator across tracts or cells, based on column-wise share normalisation, and block scores were obtained as weighted sums. The global index was either the simple mean of the three block scores or the result of reapplying the same entropy-weighting scheme to the block-level indices.

RESULTS Y DISCUSSION

Overall, the results suggest that social vulnerability is not spatially concentrated in a single sector of the municipality, but rather distributed across different areas. To facilitate the presentation and discussion of the results, the municipality of Santa Cruz de Tenerife can be divided into three broad sectors: the south-western, central urban core, and north-eastern sectors.

At the census-tract scale (Fig. 1A), the highest levels of social vulnerability are concentrated in the north-eastern sector, followed by the south-western sector and the central urban area, which generally shows comparatively lower levels. The prominence of the north-eastern sector is explained by the repeated co-occurrence of high infrastructure and socio-economic burdens, with demographic pressure reinforcing this pattern in some tracts of the sector. Moreover, this spatial pattern appears to be associated with limited access to healthcare services, denser urban areas, and, in several tracts, relatively high levels of flood-hazard exposure (e.g., the La Alegría, María Jiménez, Valleseco and San Andrés neighbourhoods).

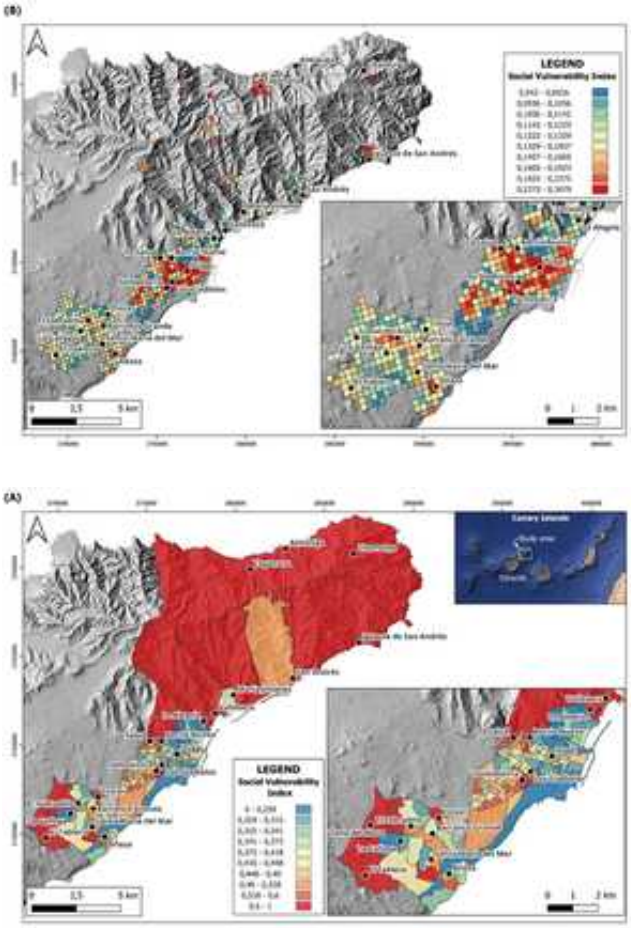


Figure 1. Social vulnerability to flooding in Santa Cruz de Tenerife, calculated at the census-tract scale using the PCA-based index (A) and at the 250 × 250 m regular-grid scale using the entropy-based index (B).

Similar spatial patterns emerge when the analysis is repeated using the entropy-based index. Despite differences in dimensional structure, weighting and tract-level ordering, both approaches highlight the north-eastern and south-western sectors as the main areas of concern, while much of the central urban core tends to remain comparatively less vulnerable.

The south-eastern sector also contains a clear concentration of highly vulnerable tracts, particularly around El Sobradillo, El Tablero, Llano del Moro, Barranco Grande, Añaza, Santa María del Mar and parts of Tincer and La Gallega, which are linked to the combination of socio-economic disadvantage and infrastructure-related constraints, with flood hazard further reinforcing high scores in several sections. Compared with PCA, the entropy-based approach tends to accentuate this south-

eastern pattern more clearly. The central area and urban core, by contrast, is more heterogeneous and method-sensitive, showing local hotspots such as La Salud, Somosierra, Barrio Nuevo and Duggi. However, these are more fragmented than the broader peripheral clusters, and their relative prominence shifts more noticeably between PCA and entropy.

At the grid-cell scale (Fig. 1B), the entropy-based results broadly confirm the tract-level geography while revealing finer pockets of vulnerability that are partly smoothed within larger census units. High values are also found in the north-eastern fringe, including Taganana, Igueste de San Andrés, Almáciga and Chamorga, and in parts of the south-eastern sector (e.g., Añaza and El Sobradillo), as well as in selected inner-city areas such as Los Gladiolos, La Salud, Duggi and La Salle.

Finally, k-means identified three broad clusters in the tract-level PCA approach. Their separation is moderate rather than sharp, indicating that the municipality is organised into overlapping vulnerability profiles rather than clearly bounded territorial types. In this sense, clustering is best understood as a typological complement to the continuous index, helping to summarise recurrent combinations of vulnerability.

CONCLUSIONS

Social vulnerability to flooding in Santa Cruz de Tenerife is spatially unequal and concentrated in neighbourhoods such as El Sobradillo, Tíncer, El Tablero and Santa María del Mar in the southern sector, La Salud, Barrio Nuevo, Somosierra and Duggi in the central urban area and across the whole Anaga massif (northeast sector), particularly Igueste de San Andrés, La Alegría and María Jiménez. PCA and entropy converge only partially, with a moderate rank correlation (Spearman's $\rho \approx 0.45$). This is enough to indicate that both approaches are capturing a similar broad geography of vulnerability, but not enough to treat them as interchangeable. That mismatch is not surprising, given that the two methods organise indicators into different dimensions and derive weights in different ways. By contrast, the regular grid provides a more even spatial support and brings out local hotspots that large census tracts can smooth over. Even so, census tracts remain the stronger basis for interpretation because they contain much richer socio-economic information, whereas the grid is limited by the lack of microdata and by the fact that many intensive variables cannot be redistributed reliably to that scale.

ACKNOWLEDGMENTS

This research is part of the project Reduction of Vulnerability and Development of Social Resilience to Climate Risks in Santa Cruz de Tenerife (REVULCLIM-TF, 2024POB30), funded by the "la Caixa" Foundation and the CajaCanarias Foundation.

It was also supported by the PLANCLIMAC 2 project, Development and Monitoring of Coordinated Actions in the Macaronesia Region Regarding Climate Change Risks and Threats (1/MAC/2/2.4/0006), co-financed by the European Union through the Interreg VI-D MAC Cooperation Programme (Madeira–Azores–Canarias) 2021–2027.

REFERENCES

Cutter, S. L. (2003). The Vulnerability of Science and the Science of Vulnerability. Annals of the Association of American Geographers, 93(1), 1–12. https://doi.org/10.1111/1467-8306.93101

Lianxiao, L., & Morimoto, T. (2019). Spatial Analysis of Social Vulnerability to Floods Based on the MOVE Framework and Information Entropy Method: Case Study of Katsushika Ward, Tokyo. Sustainability, 11(2), 529. https://doi.org/10.3390/su11020529

Martín-Raya, N., Díaz-Pacheco, J., Dorta Antequera, P., & López-Díez, A. (2024). Identifying urban prone areas to flash floods: The case of Santa Cruz de Tenerife. Progress in Disaster Science, 24, 100372. https://doi.org/10.1016/j.pdisas.2024.100372

Navarro, D., Vallejo, I., & Navarro, M. (2020). Análisis de la vulnerabilidad social a los riesgos naturales mediante técnicas estadísticas multivariantes. Investigaciones Geográficas, (74), 29. https://doi.org/10.14198/INGEO2020.NVN

Roldán-Valcarce, A., Jato-Espino, D., Manchado, C., Bach, P. M., & Kuller, M. (2023). Vulnerability to urban flooding assessed based on spatial demographic, socio-economic and infrastructure inequalities. International Journal of Disaster Risk Reduction, 95, 103894. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2023.103894

Tabari, H. (2020). Climate change impact on flood and extreme precipitation increases with water availability. Scientific Reports, 10(1), 13768. https://doi.org/10.1038/s41598-020-70816-2

Thanh Dang, L. T., Ishidaira, H., & Nguyen, K. P. (2023). Exploring the utility of the entropy method for classifying household livelihood vulnerability and adaptation strategies to salinity intrusion Impact—Empirical evidence in coastal communities of the Vietnamese Mekong delta. Environmental Development, 47, 100912. https://doi.org/10.1016/j.envdev.2023.100912

Primera edición 2026
Copyright © Asociación Española de Climatología
Esta obra recoge las aportaciones presentadas en la modalidad de comunicación extendida en el *XIV Congreso Internacional de la Asociación Española de Climatología*, celebrado en Tenerife entre el 28 y el 30 de octubre de 2026 y aceptadas por el Comité Científico.

ISBN: 978-84-7837-110-5
NIPO: 666-26-006-8 (versión impresa) y 666-26-007-3 (versión en línea)
Depósito legal: M-20917-2026
Impreso en Madrid (2026)
Imprime: Nemac Comunicación S. L.
Coeditado por: Asociación Española de Climatología y Agencia Estatal de Meteorología (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico)

ORGANIZAN







PATROCINAN



















ISBN 978-84-7837-110-5
9 788478 371105
PVP: 25,00 €