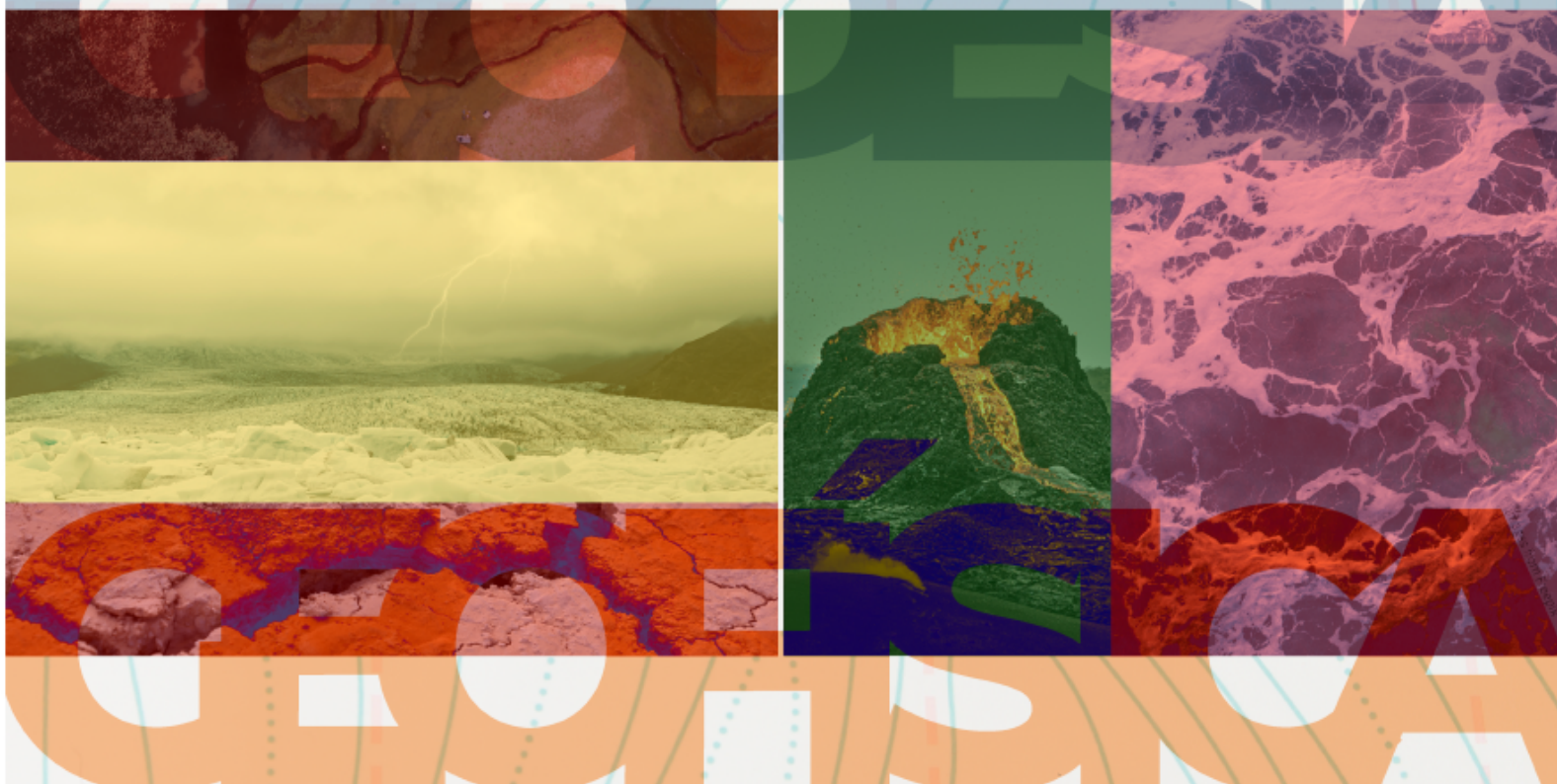




Assembleia Luso-Espanhola de Geodesia e Geofísica
Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica

24 a 27 Universidade de Évora
de junho de 2024 Colégio do Espírito Santo

LIVRO DE RESUMOS ESTENDIDOS



Organização



UNIVERSIDADE
DE ÉVORA



CREATE
CENTER FOR SCI-TECH RESEARCH
IN EARTH SYSTEM AND ENERGY



Comisión Española de
Geodesia y Geofísica

Apoio



Fundação
para a Ciência
e a Tecnologia

Título

Livro de Resumos Estendidos da 11ª Assembleia Luso Espanhola de Geodesia e Geofísica
Libro de Resumens da 11ª Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica

Editores

Rui Jorge Oliveira (UÉvora)
Bento Caldeira (UÉvora)
Daniele Bortoli (UÉvora)
Juan Luis Guerrero-Rascado (UGR)
Maria João Costa (UÉvora)
Mourad Bezzeghoud (UÉvora)
Vanda Salgueiro (UÉvora)

Comissão Científica

Coordenador: Mourad Bezzeghoud (UÉvora)

S.01. Geodesia

José Luis Berné Valero (U.P. Valencia)
Marcelino Valdés Pérez de Vargas (IGN)
María Pilar Romero Perez (UCM)
Rui Fernandes (UBI)

Juan Luis Guerrero-Rascado (UGR)
Maria João Costa (UÉvora)
Mário Jorge Pereira (UTAD/APMG)
Ricardo Trigo (ULisboa)
Rui Salgado (UÉvora)

S.02. Sismologia e Física do Interior da Terra

Antonio Angel Pazos García (ROA)
Bento Caldeira (UÉvora)
Elisa Bufo (UCM)
Fernando Carrilho (IPMA)
José Borges (UÉvora)
Juan Vicente Cantavella (IGN)
Luís Matias (ULisboa)
Maria Rosa Duque (UÉvora)
Maurizio Mattesini (UCM)

S.06. Oceanografia Física

João Dias (UA)
Paulo José Relvas de Almeida (UALg)
Ricardo Sánchez Leal (IEO)

S.07. Hidrologia

João Fragoso dos Santos (IPBeja)
Luis Barranco Díaz (CEH-CEDEX)
Maria Teresa Condeso de Melo (IST)
Carolina Guardiola Albert (IGME)

S.03. Geomagnetismo e Aeronomia

Alexandra Pais (UC)
Emilio Pueyo Morer (IGME)
Joaquim Luis (UALg)
José manuel Vaquero (UEX)
Patrícia Represas (LNEG)

S.08. Geofísica Aplicada

Carmen Pro Muñoz (UEX)
Félix Manuel Rubio Sánchez-Aguililla (IGME)
João Gameira de Carvalho (LNEG)
M. Teresa Teixidó (IAG)
Rubén Ruiz Bravo (CEDEX)
Rui Oliveira (UÉvora/APMG)

S.04. Vulcanologia

Maria Gabriela Pereira da Silva Queiroz (UAc)
Nicolau Wallenstein (UAc)

S.09. Ciências Criosféricas

António Correia (UÉvora)
Carla Mora (IGOT)
Gonçalo Vieira (IGOT/ULisboa)
Miguel Ángel de Pablo Hernández (UAH)
Mohammad Farzaman (INIIV)

S.05. Meteorologia e Ciências Atmosféricas

Daniele Bortoli (UÉvora)
Fernando Belda Esplagues (AEMET)

Comissão Organizadora

Bento Caldeira (UÉvora)
Daniele Bortoli (UÉvora)
Ediclê Duarte (UÉvora)
Elisa Buform (UCM)
Fernando Carrilho (IPMA)
Flávio Couto (UÉvora)
Helena Ribeiro (DGT)
José António Sobrino (IGN/CEGG)
José Borges (UÉvora)
Juan Luis Guerrero-Rascado (UGR)

Maelys Moulin (UÉvora/ETU-EOST)
Maria João Costa (UÉvora)
Maria Rosa Duque (UÉvora)
Marion Spitz (UÉvora/ETU-EOST)
Miguel Potes (UÉvora)
Mourad Bezzeghoud (UÉvora)
Rui Oliveira (UÉvora/APMG)
Rui Salgado (UÉvora)
Vanda Salgueiro (UÉvora)

ISBN

978-972-778-462-2

Livro de Resumos Estendidos da 11ª Assembleia Luso-Espanhola de Geodesia e Geofísica
Suporte: Eletrónico

Junho 2025

Universidade de Évora

Rua Romão Ramalho, 59 – Apartado 94 – 7002-554 Évora – Portugal

Apoios



UNIVERSIDADE
DE ÉVORA



CREATE
CENTER FOR SCI-TECH RESEARCH
IN EARTH SYSTEM AND ENERGY



Fundação
para a Ciência
e a Tecnologia



Comisión Española de
Geodesia y Geofísica

Mensagem dos editores

A publicação do Livro de Resumos Estendidos da 11ª Assembleia Luso-Espanhola de Geodesia e Geofísica (ALEGG 2024) que decorreu na Universidade de Évora, de 24 a 27 de junho de 2024, reuniu investigadores de referência para a partilha de resultados nas mais variadas disciplinas.

A ALEGG 2024 representou um momento crucial para a comunidade científica luso-espanhola, promovendo a partilha de conhecimentos, a discussão de avanços e a criação de novas sinergias nas vastas áreas da Geodesia e da Geofísica. Os resumos estendidos aqui compilados refletem a diversidade e a profundidade dos trabalhos apresentados, abrangendo um leque impressionante de tópicos, como:

- Geodesia
- Sismologia e Física do Interior da Terra
- Geomagnetismo e Aeronomia
- Vulcanologia
- Meteorologia e Ciências Atmosféricas
- Oceanografia Física
- Hidrologia
- Geofísica Aplicada
- Ciências Criosféricas

Desde a monitorização de fenómenos geodinâmicos e a análise de dados geofísicos, até ao desenvolvimento de novas metodologias e aplicações tecnológicas, este livro é um testemunho da investigação de ponta realizada por nossos cientistas.

Agradecemos a todos os participantes, autores e revisores que contribuíram para a riqueza científica desta Assembleia e para a qualidade desta publicação. Esperamos que este Livro de Resumos Estendidos sirva como uma valiosa ferramenta de consulta e inspiração para futuras investigações, reforçando a colaboração e o progresso científico na Península Ibérica e além fronteiras.

Os editores – Livro de Resumos Estendidos – ALEGG 2024

Junho de 2025

* * *

Estimado colega,

El Libro de Resúmenes Extendidos de la 11.ª Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica (ALEGG 2024), celebrada en la Universidad de Évora del 24 al 27 de junio de 2024, reunió a investigadores de referencia para compartir resultados en las más diversas disciplinas.

La ALEGG 2024 supuso un momento crucial para la comunidad científica luso-española, promoviendo el intercambio de conocimientos, la discusión de avances y la creación de nuevas sinergias en las vastas áreas de la Geodesia y la Geofísica. Los resúmenes extendidos aquí compilados reflejan la diversidad y profundidad de los trabajos presentados, abarcando un impresionante abanico de temas, como:

- Geodesia
- Sismología y Física del Interior de la Tierra
- Geomagnetismo y Aeronomía
- Vulcanología
- Meteorología y Ciencias Atmosféricas
- Oceanografía Física
- Hidrología
- Geofísica Aplicada
- Ciencias Criosféricas

Desde la monitorización de fenómenos geodinámicos y el análisis de datos geofísicos, hasta el desarrollo de nuevas metodologías y aplicaciones tecnológicas, este libro es testigo de la investigación de vanguardia realizada por nuestros científicos.

Agradecemos a todos los participantes, autores y revisores que contribuyeron a la riqueza científica de esta Asamblea y a la calidad de esta publicación. Esperamos que este Libro de Resúmenes Extendidos sirva como una valiosa herramienta de consulta e inspiración para futuras investigaciones, reforzando la colaboración y el progreso científico en la península ibérica y más allá de sus fronteras.

Los editores – Libro de Resúmenes Ampliados – ALEGG 2024

Junio de 2025

Índice

Índice.....	5
Índice de artigos.....	6

Temas

S.01	
Geodesia	
Geodesia	9
S.02	
Sismologia e Física do Interior da Terra	
Sismología y Física del Interior de la Tierra	44
S.03	
Geomagnetismo e Aeronomia	
Geomagnetismo y Aeronomía	83
S.04	
Vulcanologia	
Vulcanología	129
S.05	
Meteorologia e Ciências Atmosféricas	
Meteorología y Ciencias Atmosféricas	138
S.06	
Oceanografia Física	
Oceanografía Física	163
S.07	
Hidrologia	
Hidrología	172
S.08	
Geofísica Aplicada	
Geofísica Aplicada.....	192

Índice de artigos

High-resolution coastal morphology: evolution of a sand-spit monitoring program.....	10
BIO, Ana; MAGALHÃES, Américo; PINHAL, André; IGLESIAS, Isabel; BASTOS, Luísa; GONÇALVES, José Alberto	
Adquisición de datos geoelectricos en el Observatorio Geofísico de San Pablo de los Montes (Toledo)	18
NUÑEZ, Alberto; VALLE, José Luis; AGUADO, José; MOLINERO, Iván	
Renovação da Rede Nacional de Estações Permanentes GNSS - ReNEP	25
RIBEIRO, Helena; BERNARDES, Ana; MEDEIRO, Ana; PATRÍCIO, Paulo	
Bringing geodetic products closer to the public: database and viewer of geodetic products of the National Geographic Institute of Spain.....	30
ROSILLO, Andrea; AZCUE, Esther; LARA, Sonia; SÁNCHEZ-SOBRINO, Jose Antonio	
Monitoring of hydraulic infrastructures using satellite radar interferometry: SIAGUA project	34
RUIZ-ARMENTEROS, Antonio Miguel; MARCHAMALO-SACRISTÁN, Miguel; LAMAS-FERNÁNDEZ, Francisco; HERNÁNDEZ-CABEZUDO, Álvaro; FERNÁNDEZ-LANDA, Alfredo; DELGADO-BLASCO, José Manuel; BAKON, Matus; LAZECKY, Milan; PERISSIN, Daniele; PAPCO, Juraj; CORRAL, Gonzalo; MESA-MINGORANCE, José Luis; GARCÍA-BALBOA, José Luis; DA PENHA PACHECO, Admilson; JURADO-RODRIGUEZ, Juan Manuel; SOUSA, Joaquim J.	
Breve estudio de las señales de largos periodos del terremoto de Lorca de 11 de Mayo de 2011 ..	45
BRAVO, José Benito; SOSA, Maria Graciela	
Una historia tentativa y patrimonio preservado de una estación sísmica casi olvidada en Girona (NE Península Ibérica)	58
BATLLÓ, Josep; MERINO, Maria Teresa	
Análisis de la aportación de las técnicas geoespaciales y la inteligencia artificial en el estudio de la exposición sísmica en ciudades prioritarias de Centroamérica y Caribe.....	68
RODRÍGUEZ-SAIZ, Javier; UREÑA-PLIEGO, Miguel; GARCÍA-LANCHARES, Carlos; REJAS-AYUGA, Juan Gregorio; GONZÁLEZ-RODRIGO, Beatriz; MARCHAMALO-SACRISTÁN, Miguel	
El patrimonio sismológico en el Observatorio Fabra (Barcelona)	73
MERINO, M.T.; BATLLÓ, Josep	

Spatial total electron content gradients for Iberian Peninsula and Portuguese and Spanish archipelagos during geomagnetic storms of 2023.....	84
MOROZOVA, Anna; BARATA, Teresa	
Mapa de Declinaciones Magnéticas de la Península Ibérica y las Islas Baleares de la época 2020.0	95
NÚÑEZ, Alberto; TORDESILLAS, José Manuel	
Recuperación y procesado de datos de levantamientos aeromagnéticos de la Península Ibérica, zonas marítimas próximas e Islas Canarias	104
NÚÑEZ, Alberto; PINTOR, Pablo; TORDESILLAS, José Manuel	
Estudio sobre efectos en la ionosfera de la erupción del volcán Tonga del 15 de enero de 2022...	112
RODRIGUEZ-DÍAZ, Sara; CAMPUZANO, Saioa A.; MIGOYA-ORUÉ, Yenca; RADICELLA, Sandro M.; RODRIGUEZ-CADEROT, Gracia; HERRAIZ-SARACHAGA, Miguel	
Información de la declinación geomagnética extraída de los trabajos topográficos de deslindes de municipios realizados por el IGN en el año 1871	120
TORDESILLAS, Jose Manuel; PAVÓN-CARRASCO, F. Javier; ANQUELA, Ana Belén; CAMACHO, Elena; LÓPEZ-MUGA, Marina; NÚÑEZ, Alberto	
Gestión de datos y servicios de la comunidad vulcanológica europea por el Servicio Central Temático de Observaciones de Volcanes (EPOS-ERIC)	130
SPAMPINATO, Letizia; DOMÍNGUEZ-CERDEÑA, Itahiza; INDOVINA, Enrico; GEYER, Adelina; JÚLÍUSDÓTTIR, Ríkey; REITANO, Danilo; PUGLISI, Giuseppe; NAVE, Rosella; SANTANGELO, Ileana; VOGFJÖRD, Kristín; LABAZUY, Philippe; CACCIOLA, Lucia; GUEHENNEUX, Yannick; KOMOROWSKI, Jean-Christophe; SAUREL, Jean-Marie	
The Solar Irradiation Assessment and Mapping in Timor-Leste with ERA5, MERRA-2 and SOLCAST data	139
SARMENTO, Nelson; POTES, Miguel; CANHOTO, Paulo	
Effect of a volcanic plume event in the local shortwave radiative forcing (Évora, Portugal)	151
SALGUEIRO, Vanda; COSTA, Maria João; GUERRERO-RASCADO, Juan Luis, BORTOLI, Daniele	
Modelação da piro-convecção durante mega incêndios em Portugal	156
COUTO, Flavio T.; CAMPOS, Cátia; FILIPPI, Jean-Baptiste; BAGGIO, Roberta; PURIFICAÇÃO, Carolina; SANTOS, Filipe L. M.; SALGADO, Rui	

Influência da circulação induzida pela topografia na dispersão dos fragmentos de rocha gerados durante atividades de mineração em alto mar	164
AMORIM, Fabíola; IGLESIAS, Isabel; BIO, Ana	
Indicadores de desempenho em resposta a seca hidrológica nos aquíferos do Algarve	173
Neves, Maria C.	
Compleitude de linhas de água do OpenStreetMap numa região da Serra da Estrela	183
MONTEIRO, Elisabete; PATRÍCIO, Glória	
Estudio geofísico del deslizamiento de Albuñuelas (sureste de España) mediante el uso de medidas de ruido ambiente	193
MITA, Mara; GALIANA-MERINO, Juan José; GARRIDO, Jesús; LENTI, Luca; MARTINO, Salvatore; PAPPADOPOULOU, Jacopo; PELÁEZ, José A.; BENABDELOUED; Boualem Youcef Nassim; DELGADO, José	
Instrumento de gestão de áreas contaminadas por metais combinando dados de Química, Geofísica, Detecção Remota, Inteligência Artificial e Gestão – Projeto INCOME.....	201
OLIVEIRA, Rui J. ^(1*) ; CALDEIRA, Bento; PALMA, Patrícia; COSTA, Maria J.; FIALHO, Ana	

S.01

Geodesia
Geodesia

High-resolution coastal morphology: evolution of a sand-spit monitoring program

BIO, Ana ⁽¹⁾; MAGALHÃES, Américo ⁽²⁾; PINHAL, André ⁽³⁾; IGLESIAS, Isabel ⁽¹⁾; BASTOS, Luísa ⁽¹⁾; GONÇALVES, José Alberto ^(1,3)

⁽¹⁾ Centro Interdisciplinar de Investigação Marinha e Ambiental (CIIMAR/CIMAR), Matosinhos, Portugal

⁽²⁾ Observatório Astronómico Prof. Manuel de Barros, Faculdade de Ciências, Universidade do Porto, Vila Nova de Gaia, Portugal

⁽³⁾ DGAOT, Faculdade de Ciências, Universidade do Porto, Porto, Portugal

Corresponding author: anabio@ciimar.up.pt

SUMMARY

In 2001, a sand-spit monitoring program was put in place to assess the morphodynamics of the estuarine sand spit, at the outlet of the Douro River, in northern Portugal. Monitoring started with four surveys per year, before the extension and construction of breakwaters, changing to bi-annual surveys when the spit settled into a new and less dynamic shape. Through the more than two decades of monitoring, the survey technologies and methods developed from RTK surveys on foot, to the use of terrestrial mobile mapping systems (MMS) and of unoccupied aerial systems (UAS). The resulting digital elevation models (DEM) from the terrestrial RTK methods and from the UAS surveys, based on RGB imagery and photogrammetry, are presented and compared. Near-simultaneous terrestrial and UAS surveys allowed direct comparison between the terrestrial mobile mapping and the photogrammetric UAS mapping, with the main differences being: the study-area coverage, which can be considered complete for the aerial survey, yet limited to tracks and requiring interpolation between tracks for the terrestrial survey; the capacity of the terrestrial methods to survey the ground level without interference of vegetation or trees, which affect the UAS-survey DEM; and the direct contact with the ground of the terrestrial system, which is informative but also invasive. Survey systems applicability, resolution, accuracy and efficiency are discussed, as well as sources of error.

KEYWORDS

Coastal morphology, DEM, Sandpit, UAS, MMS, Geodesy.

INTRODUCTION

Monitoring coastal morphology is essential to understand coastal dynamics and for the development of sustainable coastal management practices. The evolution in positioning and navigation through satellite systems, and, in special, the developments of Real-Time Kinematic (RTK) survey methodologies, have revolutionized the way coastal areas are monitored. In Portugal, these methods started being used in the late 90's, with the installation of permanent stations for the post-processing of positioning data. This allowed collection of precise elevation data for the construction of digital elevation models (DEM), as well as quantification of coastal dynamics and sediment budgets through comparison of successive DEM.

Initially, coastal morphology monitoring was performed along profiles, perpendicular to the shoreline, using classical surveying equipment. This was slow, labour-intensive, and therefore expensive and inefficient, resulting in data at low spatial and temporal resolutions. With the advent of satellite positioning, coastal morphology monitoring using terrestrial mobile mapping systems and Real-Time Kinematic Global Navigation Satellite System (RTK-GNSS) became increasingly popular. These systems are much more efficient and precise, providing better data coverage and quality, with horizontal and vertical accuracies between 5 and 10 cm [1], adequate for the identification of short-term changes as well as long-term trends [2]. Next to the terrestrial monitoring of coastal morphology, aerial remote sensing methods based on photogrammetry can be used [3,4,5]. These have the advantage of providing dense 3D data, with resolutions depending on the survey platform (plane or drone), flight height and sensor (camera) resolution. For high-resolution surveys of dynamic coastal structures, like sand beaches and spits, Unoccupied Aerial Systems (UAS), or drones, are particularly useful, being easy to deploy, versatile and cost-effective [1,2].

The present work aims to present the evolution of the Douro sand spit, in Northern Portugal, as well as the evolution of the survey methods applied, in more than two decades. Data were obtained in the scope of a monitoring program, promoted by the local port authorities, to assess morphology changes of the sand spit before and after engineering interventions, i.e. the extension of an up-drift breakwater and the construction of a detached breakwater next to the spit. A series of 36 bi-annual terrestrial surveys and 8 UAS surveys, was analysed to assess sand spit dynamics between 2001 and 2023, and results obtained by terrestrial and airborne survey systems were compared.

DATA AND METHODS

Site description

The Douro River is the second largest river of the Iberian Peninsula. Its estuary, which extends for approximately 22 km between the Crestuma-Lever dam and the Atlantic Ocean, lies in a steep valley, between two large cities, Porto to the north and Vila Nova de Gaia to the south. Its hydrodynamics is dominated by the river flow, which can be torrential in winter, and by the tides when river flows are low, particularly during the summer months [6], when the estuary presents a salt-wedge configuration [7]. Water depths vary between 0 m and 10 m, with some deeper regions of up to 28 m depth located at narrower sections, outer bends, and former sites of sediments extraction [8,9]. On the southern margin of the estuary mouth a sand spit protects the estuary against the impact of ocean waves during storm events. This spit used to be very dynamic, in shape and extension, often growing northward into the navigation channel and endangering navigation. Between 2004 and 2008 the northern breakwater was extended by 300 m and a detached breakwater was built next to the spit head, to change hydrodynamics and improve navigation safety, reducing the need for navigation channel dredging. During the process, the northern part of the spit was reshaped, removing excess sediment, and fortified with boulders (Fig. 1).



Figure 1: The Douro sand spit in June 2006, i.e. before the intervention (a) and in July 2023, with the cities Porto on the upper, northern margin and Vila Nova de Gaia on the lower, southern margin; 1: extended northern breakwater, 2: detached breakwater (Images: GoogleEarth, Maxar and Airbus).

Surveys

Between 2001 and 2009, terrestrial survey methods were used (Fig. 2). From 2001 to the first half of 2005, surveys were performed on foot with an RTK-GNSS receiver attached to a walking wheel. Afterwards and until 2008 surveys were done with a moto quad bike, and between 2009 and 2019 with a utility vehicle. All surveys used a dual-frequency GNSS receiver operated in kinematic mode, and took place in spring-low-tide conditions, surveying first the instantaneous waterline and subsequently a grid of tracks distributed over the sand spit. DEM were computed from the point observations, creating a triangulated irregular network (TIN) and converting it to a regular grid/raster by linear interpolation. Starting 2018, a UAS equipped with a 20 MPixel camera was used, flying at 75 m height, which resulted in images with 2.5 cm ground-sampling distance. Image orientation was based on pre-signalised points (ground-control points, GCP), placed on the ground before the flight and surveyed with a GNSS receiver, in RTK mode, corrected using a fixed station (from the ReNEP – Rede Nacional de Estações Permanentes GNSS) for correction. Positioning had a horizontal and vertical accuracy of 2 cm. Image orientation and DEM generation were done in Agisoft Photoscan, through point-cloud matching of overlapping images [10,11]. Validation showed that the resulting DEM had an accuracy between 4 cm and 6 cm for both, terrestrial and airborne methods.

In April 2018 the area was surveyed nearly-simultaneously using the vehicle and the UAS, to allow comparison of both methods. On that date, next to the usual GCP, an additional transect was surveyed on foot, using the walking wheel. A total of 69 elevations were measured *in situ* (Fig. 3).



Figure 2: Survey methods: walking wheel (a), moto quad (b), utility vehicle (c) and UAS (d).

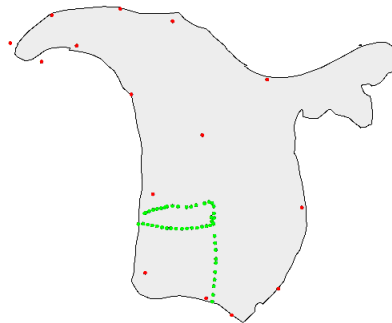


Figure 3: Points were precise positioning and elevation were measured *in situ* (red: GCP, green: additional track surveyed with a walking wheel).

RESULTS

Spit evolution

As expected, the northern part of the sand spit stabilized after its fortification with boulders and the extension and construction of the breakwaters. A sand bar pointing east into the estuary formed and the body of the spit grew markedly westward (Fig. 4). Between 2001 and the beginning of the breakwater construction in 2005, sand spit area and volume varied, showing an overall increasing trend. Its volume above mean sea level increased by 65% and its area by 25%. During the construction (2005-2008) the spit was relatively stable growing only 4% and 7% in volume and area, respectively. After breakwater construction, the spit grew steadily, gaining further 86% and 46% in volume and area, respectively (Fig. 5). However, accretion seems to be slowing down in recent years. Between spring 2008 and spring 2018, yearly accretion averaged 55039 m^3 ; between spring 2016 and spring 2023, it averaged 22503 m^3 .

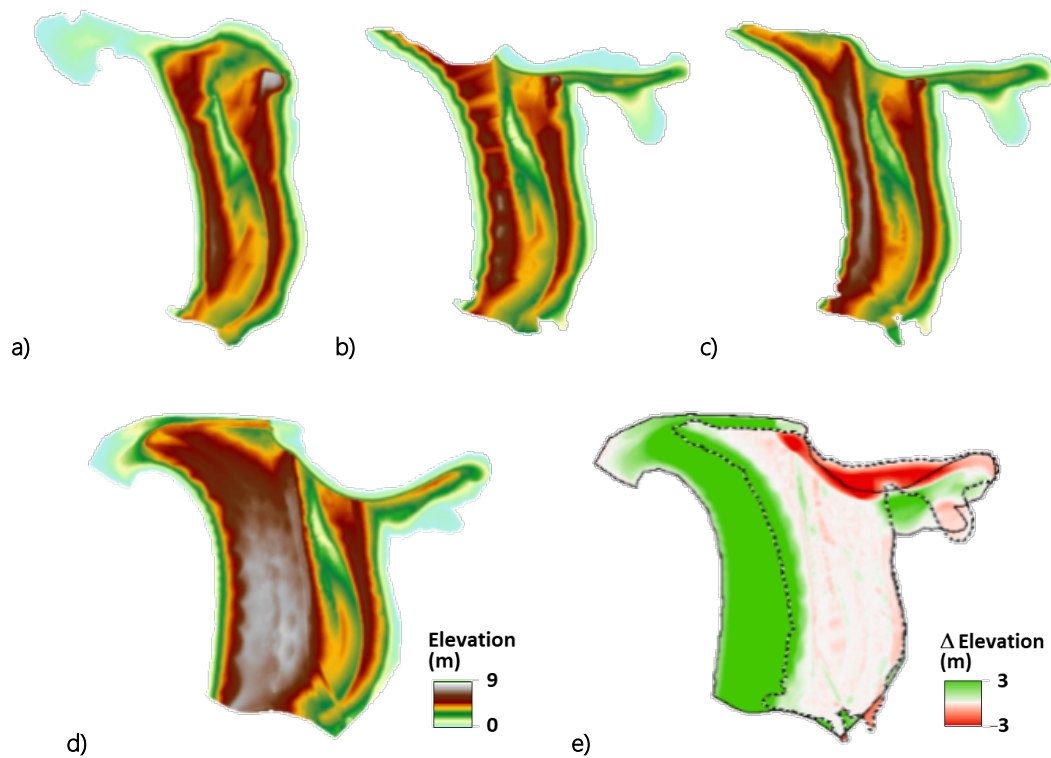


Figure 4: Examples of DEM for March 2003 (a), March 2007 (b), April 2008 (c) and November 2023 (d), i.e. before, during, at the end of breakwater construction, and recently, respectively, and spit development since breakwater construction (e), i.e. between d) and e) (dotted line: April 2008, continuous line: November 2023, green: accretion, red: erosion).

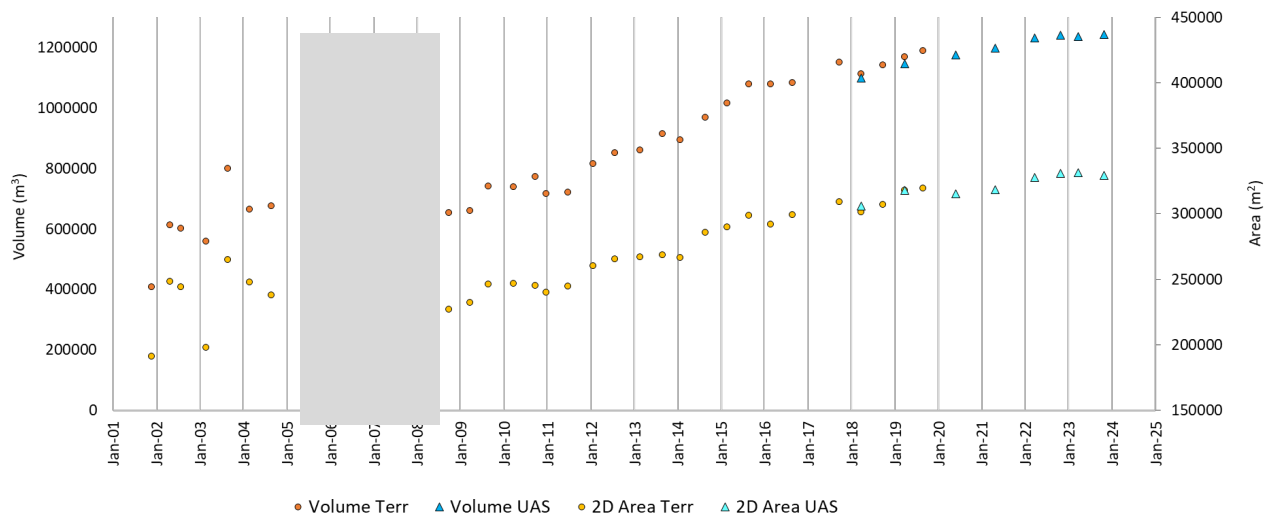


Figure 5: Sand spit volume (above 1 m MSL) and area (at 1 m MSL) along time, calculated from the DEM obtained from the surveys done by foot or terrestrial vehicle (Terr) or UAS; the shaded area indicates the period of breakwater construction.

Impact of survey and analysis methods

Moving from on-foot to motorized survey platforms allowed a denser grid of observations, which is reflected in the DEM (Fig. 6). Whereas early surveys resulted in rough DEM, with visible interpolation artefacts (Fig. 6a), surveys taken with the moto quad and the utility vehicle presented smoother and more detailed DEM, e.g. showing the cusps on the western coast (Figs. 6b,c). UAS surveys led to very precise and detailed DEM, where even trees and fences are clearly visible (Fig. 6d).

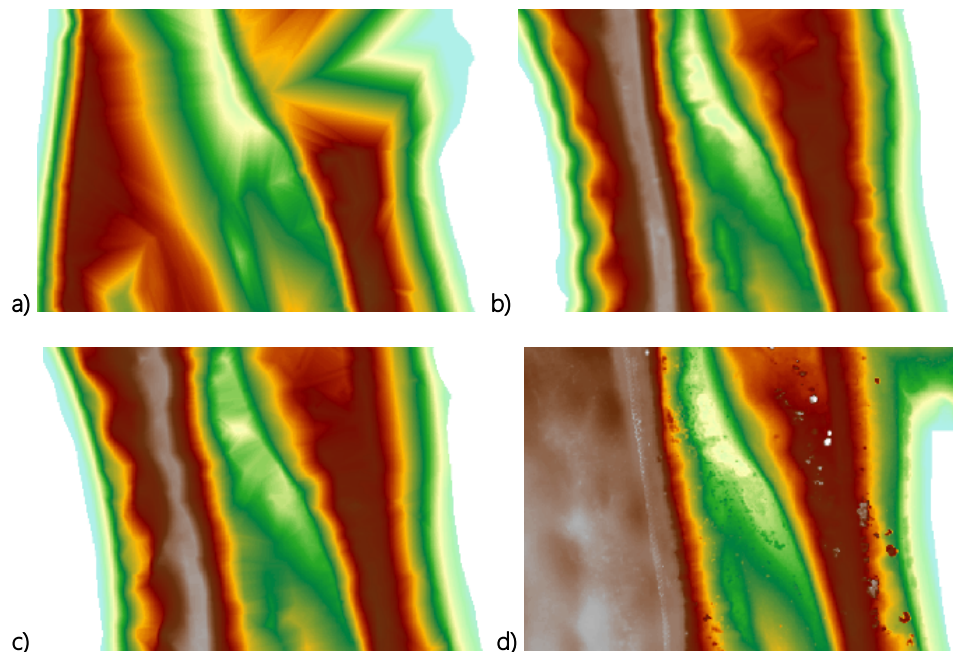


Figure 6: Part of the DEM obtained for the surveys done with the waking wheel in August 2002 (a), moto quad in December 2006 (b), utility vehicle in June 2008 (c) and UAS in April 2019 (d).

The simultaneous terrestrial and airborne surveys taken in April 2018 allowed comparison of the methodologies and their output. There were several areas where marked difference occurred between the terrestrial and the aerial DEM (Fig. 7a). Most of these differences were found in-between the vehicle tracks, i.e. in areas where the observations were interpolated to obtain the DEM (Fig. 7b). Another source of discrepancies was vegetation, which was captured by the drone and visible in the DEM obtained through photogrammetry, but was avoided by the terrestrial vehicle, which drove around it (Fig. 7c). A fence, installed on the spit crest to retain sediment, was also presented in the aerial DEM but not in the terrestrial (Fig. 7d).

Overall and considering only the overlapping area of the two surveys, mean DEM elevation was 4.44 m (SD=2.10 m) and 4.35 m (SD=2.14 m) for the terrestrial and aerial surveys, respectively. On average, the terrestrial DEM is therefore higher than the aerial, in spite of the elevated features (trees, fence) that are only present in the latter. Comparing DEM values with the elevations measured *in situ* at the 69 points (Fig. 3), terrestrial DEM height values were on average 0.10 m (SD=0.07 m) and aerial DEM height values were on average 0.4 m (SD=0.03 m) lower than the *in-situ* height values. To assess the impact of the interpolation method, the terrestrial data were also interpolated using the nearest neighbour method [12]. Compared to the UAS-based DEM, the terrestrial data interpolated with a TIN were on average 0.09 m (SD=0.19 m) lower, whereas the data interpolated with Nearest Neighbour were only 0.01 m lower (SD=0.19 m) (Fig. 8).

DISCUSSION

Spit evolution

The interventions in the Douro Estuary outlet, with extension of the northern breakwater and construction of a detached breakwater, have succeeded in changing sand spit behaviour. The spit that used to be very dynamic in shape and size, has acquired a relatively stable T-shape, forming a tombolo towards the detached breakwater and an extension into the estuary (see also the previous study [13]). This is likely due to the breakwaters that have changed local hydrodynamics, causing faster flows in the inlet navigation channel, as well as due to the fortification of the spit head, which hampers its dynamics and growth to the north. In terms of area and volume, the spit increased massively, expanding westwards, although the accretion rate is apparently slowing, suggesting that the spit may be approaching a stable size. The strength of this spit is important, as it should serve as a protection for the estuary against ocean wave impacts, but also used to act as a fuse in case of severe river floods. The overtopping and breaching of the spit by flood waters seems increasingly unlikely, raising concerns for possible future severe floods.

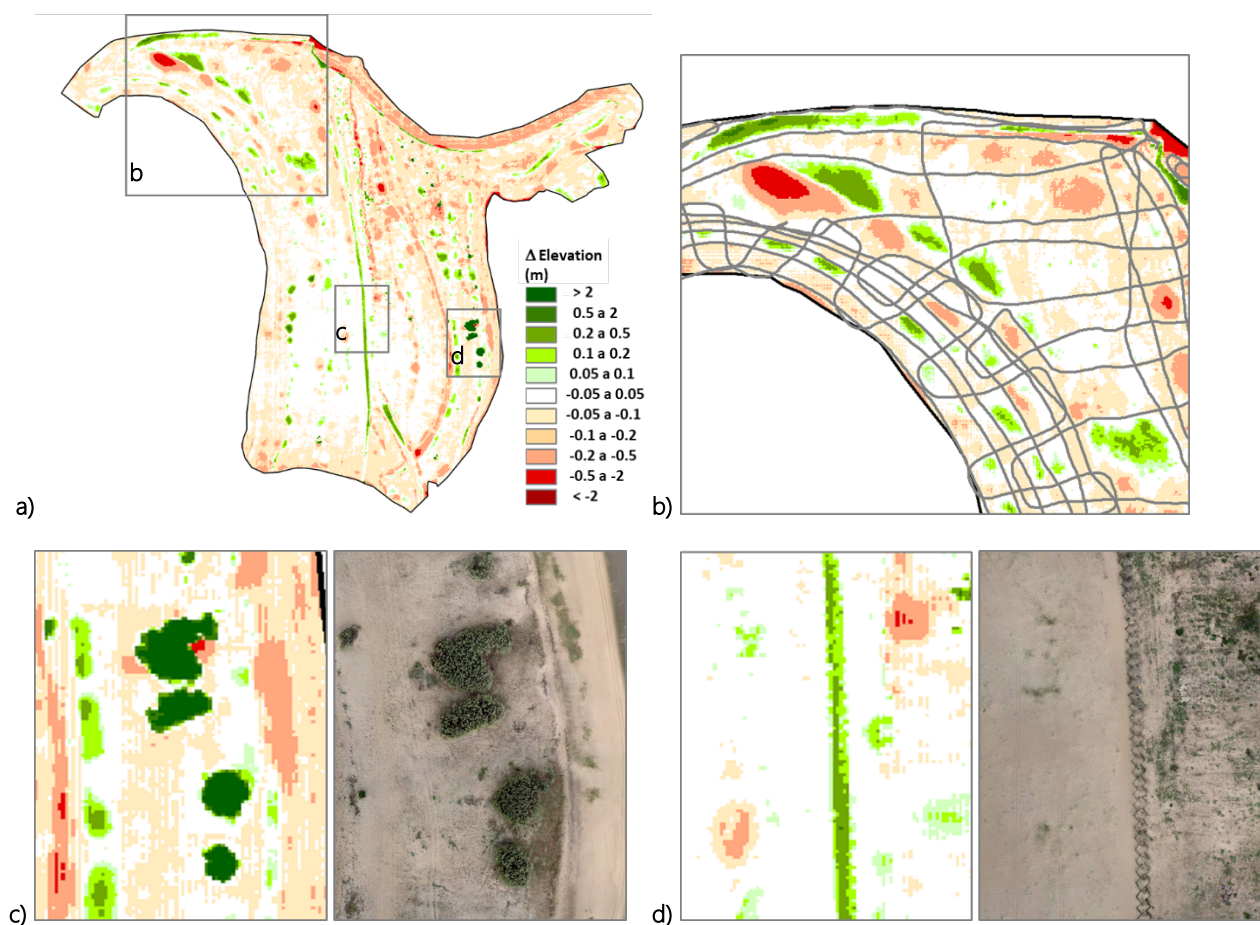


Figure 7: Differences between the DEM obtained by terrestrial and aerial surveys in April 2018, showing the height differences for the whole spit, i.e. aerial DEM minus terrestrial DEM (a), differences related to the interpolation of the terrestrial height measurements (b), with lines representing the ground vehicle track), and to trees (c) and a fence (d), with the aerial orthophoto.

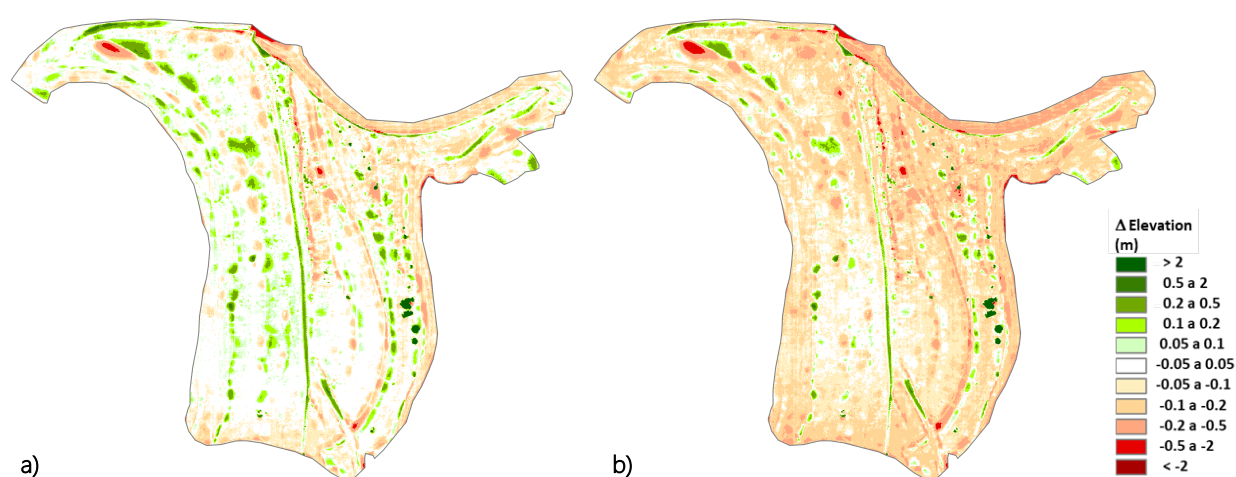


Figure 8: Differences between the DEM obtained by terrestrial and aerial surveys in April 2018, i.e. aerial DEM minus terrestrial DEM, for the terrestrial DEM interpolated using the TIN (a) and Nearest Neighbour (b) methods.

Survey methods

The developments in terms of survey methods have improved survey results. Mobile mapping using vehicles allowed for better

coverage and more realistic and detailed DEM, compared to the early labour-intensive slow on-foot surveys. Nonetheless, on-foot surveys are still used in coastal monitoring [14]. Aerial surveys further improved monitoring results, providing a complete coverage of the sand spit, with very high data resolution (depending mainly on flight height). Aerial surveys were also easier, faster and less invasive, as access on the ground was only necessary to mark GCP. In the future even that won't be necessary, as recent UAS, incorporate high-precision positioning and orientation systems (POS), allowing to provide precise results without GCP.

The comparison of the DEM obtained with terrestrial mobile mapping and aerial photogrammetry and points measured *in situ* showed that the aerial method provides better results. Nonetheless, there seems to be a bias as both survey methods overestimate heights (on average by 4 cm and 10 cm, for the terrestrial and aerial method respectively). To assess why the terrestrial method performed less well, outputs of the two methods were compared for the simultaneous survey in April 2018. Results show that differences occurred particularly in areas between the ground survey tracks, suggesting that interpolation in areas without data was a major source of error. Structures visible in the UAS-based DEM but avoided in the terrestrial survey also contributed to observed differences. In fact, the airborne DEM is a digital surface model, whereas the terrestrial one can be considered as a digital terrain model (following the ground level and omitting trees etc.). Therefore, the most recent surveys have been processed applying a filter to eliminate the structures above ground, such as the trees.

The fact that the vehicle was not equipped with an Inertial Measurement Unit (IMU) may also have contributed to uncertainties. However, considering a GNSS receiver at 2 m above the ground, even a slope of 10% (corresponding to an angle of 5°) would result in a horizontal error of 17 cm but in a vertical error of less than 1 cm. A slope of 18% (which hardly occurs on this spit) would result in 3 cm vertical error (Fig. 8). The error due to the lack of an IMU is thus less than the positioning error and certainly less than interpolation errors. In fact, the interpolation method proved to be very influential. Interpolation through a TIN produced a DEM that consistently overestimated terrain heights. This may be due to a predominance of concave structures in the relief, which are "filled" by this method which interpolates in straight lines between observations (in convex structures, the method will underestimate the volume). The second interpolation method tested, Nearest Neighbour, produced a DEM that was much closer to the UAS-based DEM and to the *in-situ* measurements.

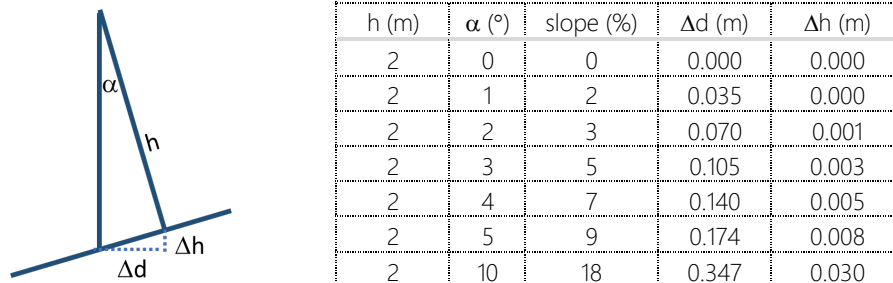


Figure 9: Horizontal and vertical errors due to vehicle inclination; α : angle of inclination, h: height above ground of the GNSS receiver, Δd : horizontal error, Δh : vertical error.

CONCLUSION

Coasts and sand spits in particular are dynamic by nature. Given their importance as often densely populated and heavily used land-ocean interfaces, their monitoring is of utmost importance for the understanding of local dynamics and for informed coastal management. Recent monitoring methodologies, particularly through remote sensing using UAS, allows us to obtain reliable data on coastal morphology at adequate spatial and temporal scales. They further provide a good coverage of the study area, with no need for interpolation.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by the project CAPTA (0062_CAPTA_1_E), cofounded by the European Union through the Interreg VI-A Spain-Portugal (POCTEP) 2021-2027 programme, and partially supported by the Strategic Funding UIDB/04423/2020, UIDP/04423/2020 and LA/P/0101/2020 through national funds provided by the Portuguese Foundation for Science and Technology (FCT). I. Iglesias further acknowledges the FCT financing through the CEEC program (2022.07420.CEECIND). We further thank the APDL (Administração dos Portos do Douro, Leixões e Viana do Castelo) for supporting many of the campaigns.

REFERENCES

- [1] Gonçalves, J.A., L. Bastos, S. Madeira, A. Magalhães and A. Bio (2018) "Three-dimensional data collection for coastal management – efficiency and applicability of terrestrial and airborne methods". *International Journal of Remote Sensing*, 39, 24, 1-20. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1523591>
- [2] Robin, N., F. Levoy, E. J. Anthony and O. Monfort (2020): "Sand spit dynamics in a large tidal-range environment: Insight from multiple LiDAR, UAV and hydrodynamic measurements on multiple spit hook development, breaching, reconstruction, and shoreline changes". *Earth Surface Processes and Landforms*, 45, 2706-2726. <https://doi.org/10.1002/esp.4924>
- [3] Long, N., B. Millescamp, B. Guillot, F. Pouget and X. Bertin (2016): "Monitoring the topography of a dynamic tidal inlet using UAV imagery". *Remote Sensing*, 8, 387. <https://doi.org/10.3390/rs8050387>
- [4] Mateos, R. M., J. M. Azañón, F. J. Roldán, D. Notti, V. Pérez-Peña, J. P. Galve, J. L. Pérez-García, C. M. Colomo, J. M. Gómez-López, O. Montserrat, N. Devantèry, F. Lamas-Fernández and F. Fernández-Chacón (2017): "The Combined Use of PSInSAR and UAV Photogrammetry Techniques for the Analysis of the Kinematics of a Coastal Landslide Affecting an Urban Area (SE Spain)." *Landslides*, 14, 2743–754. doi:10.1007/s10346-016-0723-5.
- [5] Smith, A., B. Lunardi, E. George and C. Houser (2020). "Monitoring Storm Impacts on Sandy Coastlines with UAVs". In: J. P. Tiefenbacher and D. Poreh (Eds.) "Spatial Variability in Environmental Science - Patterns, Processes, and Analyses". doi: 10.5772/intechopen.91459
- [6] Iglesias, I., A. Bio, L. Bastos and P. Avilez-Valente (2021). "Estuarine hydrodynamic patterns and hydrokinetic energy production: The Douro estuary case study". *Energy*, 222, 119972. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.119972>.
- [7] Iglesias, I., A. Bio, W. Melo, P. Avilez-Valente, J.L. Pinho, M. Cruz, A. Gomes, J. Vieira, L. Bastos and F. Veloso-Gomes (2022): "Hydrodynamic models ensembles for climate change projections at estuarine regions". *Water* 2022, 14, 12, 1966. doi: 10.3390/w14121966
- [8] Iglesias, I., J. L. Pinho, P. Avilez-Valente, W. Melo, A. Bio, A. Gomes, J. M. Vieira, L. Bastos and F. Veloso-Gomes (2022): "Improving estuarine hydrodynamic forecasts through numerical model ensembles." *Frontiers in Marine Science*, 9, 812255. doi: 10.3389/fmars.2022.812255
- [9] Portela, L. (2008): "Sediment transport and morphodynamics of the Douro river estuary". *Geo-Marine Letters*, 28, 77–86. doi: 10.1007/s00367-007-0091-1
- [10] Gonçalves, J.A. and R. Henriques (2015): "UAV photogrammetry for topographic monitoring of coastal areas". *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 104, 101-111. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.02.009>
- [11] Agisoft LLC. (2022): "Agisoft Metashape User Manual Professional Edition, Version 1.8". Agisoft Metashape. Available at: https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_1_8_en.pdf
- [12] Sibson, R. (1981): "A Brief Description of Natural Neighbor Interpolation." Chapter 2 in "Interpolating Multivariate Data". John Wiley & Sons, New York, 21–36.
- [13] Bastos, L., A. Bio, J. L. S. Pinho, H. Granja and A. Jorge da Silva (2012): "Dynamics of the Douro estuary sand spit before and after breakwater construction". *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 109, 53-69. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2012.05.017>.
- [14] Van der Lugt, M. A., J. W. Bosma, M. A. de Schipper, T. D. Price, M. C. G. van Maarseveen, P. van der Gaag, G. Ruessink, A. J. H. M. Reniers and S. G. J. Aarninkhof (2024): "Measurements of morphodynamics of a sheltered beach along the Dutch Wadden Sea". *Earth System Science Data*, 16, 903-918. <https://doi.org/10.5194/essd-16-903-2024>, 2024.

Adquisición de datos geoelectricos en el Observatorio Geofísico de San Pablo de los Montes (Toledo)

NUÑEZ, Alberto ⁽¹⁾; VALLE, José Luis ⁽²⁾; AGUADO, José ⁽³⁾; MOLINERO, Iván ⁽³⁾

(1) Área de Geomagnetismo, Instituto Geográfico Nacional, Madrid, España

(2) Área de Geomagnetismo, Instituto Geográfico Nacional, Observatorio Geofísico de Toledo, Toledo, España

(3) Área de Geomagnetismo, Instituto Geográfico Nacional, Observatorio Geofísico de San Pablo de los Montes, Toledo, España

Autor correspondiente: anmurillo@transportes.gob.es

SUMMARY

Since 2018, the Instituto Geográfico Nacional (Spain) conducts observations of the electrical field at a geoelectrical station deployed at the Geophysical Observatory of San Pablo de los Montes (Toledo). The aim of this geoelectrical observations is to analyze its temporal variation and, jointly with the high-quality geomagnetic observations recorded at the Observatory, to try to characterize the geomagnetic storms caused by solar activity. At an initial stage of five years, the station consisted of four non-polarizable electrodes of Cu-CuSO₄ buried with bentonite, which lied at the endpoints of three arms which shared a central electrode. In 2023, we have renovated the device, so that its new configuration presents two pairs of electrodes deployed along two arms oriented in N-S and E-W directions, each arm measuring approximately 65 m long. Measurements of the electrical potential (self-potential) in each direction are collected with a digitizer ADAM-4017 and stored in a platform of data acquisition MAGREC, allowing us to obtain the potential data with one-second accuracy, as well as the measurement of the internal temperature of the room where the two instruments are placed and the constant voltage of the battery of both the digitizer and the platform. In the short period of time passed since the renovated station started to operate, it has already detected significant storms. The first of them was the event of the 24th September 2023, recorded with K-index equal to 5 at the Observatory. The event occurred from the 10th to the 12th May 2024, with K-index equal to 8, has to be remarked as the most significant storm that has been detected at the Observatory in the last 20 years.

PALABRAS CLAVE

Asamblea Hispano Portuguesa, Geomagnetismo, Geoelectricidad, Observatorio Geofísico, Tormenta Geomagnética, Índice K.

INTRODUCCIÓN

Como parte de las actividades desarrolladas en el campo de la Meteorología Espacial, desde el año 2018 el Instituto Geográfico Nacional (IGN) realiza observaciones del campo eléctrico en una estación geoelectrica situada en el Observatorio Geofísico de San Pablo de los Montes (Toledo) (figura 1). Los objetivos principales de estas mediciones son analizar la variación temporal del campo en el emplazamiento de la estación y, adicionalmente, utilizar este parámetro, juntamente con las observaciones geomagnéticas de alta calidad del Observatorio, para caracterizar las tormentas geomagnéticas debidas a la actividad solar (IGN, 2024).

En una etapa inicial de cinco años, el dispositivo consistía en cuatro electrodos impolarizables de Cu-CuSO₄ enterrados con bentonita y dispuestos en los extremos de tres brazos con un electrodo central común. En 2023 se ha renovado la configuración del dispositivo, que pasa a presentar dos parejas de electrodos dispuestas en dos brazos con direcciones N-S y E-W, cada uno con una longitud aproximada de 65 m.

INSTALACIÓN

Una parte fundamental para el funcionamiento de la línea geoelectrica es la elección de la ubicación de los sensores (figura 2). Es recomendable la ausencia de elementos que puedan causar perturbaciones en la medida de los sensores (líneas eléctricas aéreas, cables eléctricos soterrados, cimentaciones de estructuras y elementos metálicos), por lo que se eligió una parcela dentro de las instalaciones del Observatorio, alejada de elementos perturbadores.

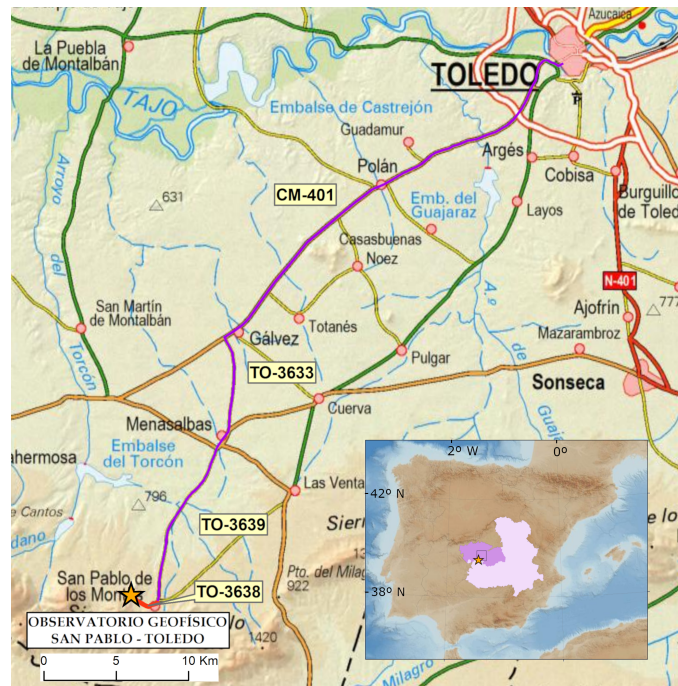


Figura 1: Ubicación del Observatorio Geofísico de San Pablo de los Montes. En el *insert*, se muestra la superficie de la Comunidad Autónoma de Castilla-La Mancha (España) en color violeta claro. Igualmente, se destaca en color violeta oscuro la superficie correspondiente a la provincia de Toledo, como parte integrante de la citada comunidad autónoma.



Figura 2: Localización de los electrodos de la línea geoelectrica.

Una vez efectuado el replanteo con un teodolito equipado con un declinómetro Bartington para marcar las direcciones de las componentes N-S y E-W del campo magnético, se realizó la excavación de unos agujeros para colocar cada uno de los electrodos a una profundidad de 1m para evitar las variaciones producidas por las oscilaciones térmicas.

Tras la excavación y limpieza del hueco, se colocó el sensor con la parte cerámica hacia arriba, fijando el mismo con tierra procedente de la excavación y rellenando toda la parte del sensor con una mezcla de bentonita y CuSO_4 , garantizando la correcta humedad y transferencia de las corrientes eléctricas (figura 3).

Todo el cableado de los sensores se instaló mediante una red de canalizaciones soterradas hasta un edificio situado en las proximidades de la parcela donde se ubican los electrodos, donde están instalados: dos digitalizadores ADAM-4017, una plataforma de adquisición de datos MAGREC-4C, una batería de 12 V para alimentar todo el sistema conectada a un cargador para estabilizar la corriente proporcionada, y una pantalla para monitorizar el funcionamiento del sistema (figura 4).

Las medidas de diferencia de potencial eléctrico entre electrodos (potencial espontáneo o self-potential) adquiridas permiten obtener el dato de potencial con precisión de segundo.



Figura 3: Posición del electrodo dentro del hueco.



Figura 4: Disposición de los equipos dentro del edificio.

DETECCIÓN DE LA TORMENTA GEOMAGNÉTICA DEL 10 AL 12 DE MAYO DE 2024

Uno de los objetivos principales del proyecto es el estudio de las tormentas geomagnéticas. En este sentido, un primer parámetro utilizado es el valor del índice K, que es calculado cada tres horas en tiempo real a partir del registro continuo del campo geomagnético en el Observatorio de San Pablo de los Montes. Este parámetro permite estimar de forma temprana la categoría alcanzada por la tormenta de acuerdo con la escala de la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (NOAA) (tabla 1).

Tabla 1: Clasificación de Tormentas Geomagnéticas según NOAA.

Tormentas Geomagnéticas			
Categoría		Medida física	Frecuencia media de tormentas
Escala	Descripción	(Valores Kp determinados cada 3 horas)	(1 ciclo = 11 años)
G5	Extrema	Kp = 9	4 cada ciclo (4 días cada ciclo)
G4	Severa	Kp = 8 y 9	100 cada ciclo (60 días cada ciclo)
G3	Fuerte	Kp = 7	200 cada ciclo (130 días cada ciclo)
G2	Moderada	Kp = 6	600 cada ciclo (360 días cada ciclo)
G1	Menor	Kp = 5	1700 cada ciclo (900 días cada ciclo)

Modificado de <https://www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation> (NOAA)

En el conjunto de gráficas siguiente, se muestra la evolución de los distintos parámetros geomagnéticos y geoelectrónicos monitorizados en el Observatorio de San Pablo de los Montes durante la tormenta que se inició el día 10 de mayo de 2024, y que se prolongó hasta el día 12, que ha sido la tormenta geomagnética con más intensidad registrada en el Observatorio en los últimos 20 años.

A nivel planetario, esta tormenta tuvo un índice Kp igual a 9, que según la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica nos remite a una tormenta magnética extrema (G-5). El incremento del índice trihorario entre el periodo anterior al inicio de la tormenta (K igual a 3) y el inicio de la misma (K igual a 7), nos define perfectamente la irrupción de esta, alcanzando el índice un valor máximo igual a 8 en el Observatorio (figuras 5 y 6).

Igualmente, el registro de las derivadas parciales de las componentes X, Y del campo magnético, con respecto del tiempo, y el registro del campo eléctrico son perfectamente identificables y limpios. Se observa, además, la clara correspondencia entre la derivada de X (Norte) y la componente del campo eléctrico en dirección E-W (figura 7), así como la evolución paralela de la derivada de Y (Este) y la componente del campo eléctrico en dirección N-S (figura 8).

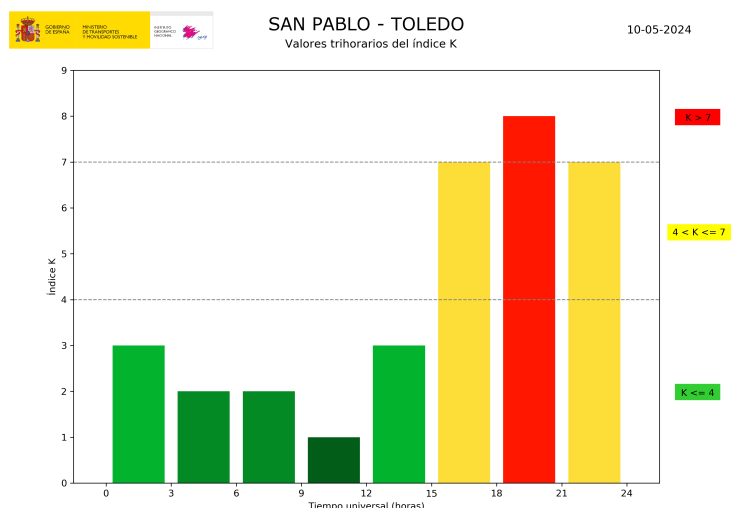


Figura 5: Registro del índice K en la tormenta magnética del día 10 de mayo de 2024 en el Observatorio de San Pablo.

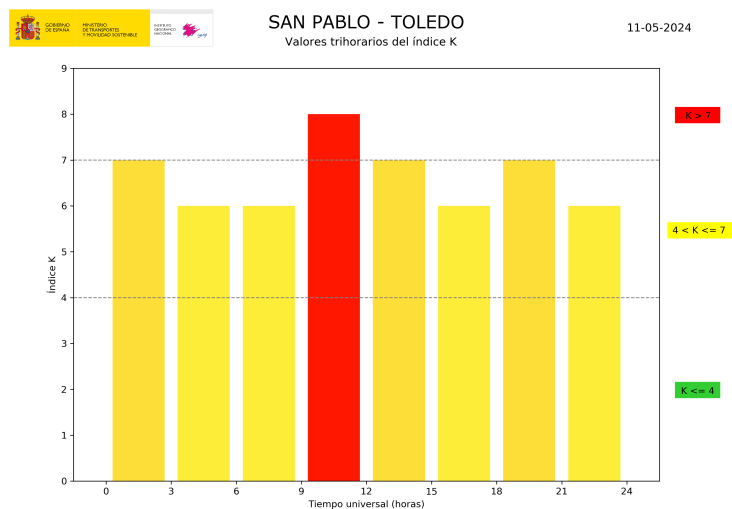


Figura 6: Registro del índice K en la tormenta magnética del día 11 de mayo de 2024 en el Observatorio de San Pablo.

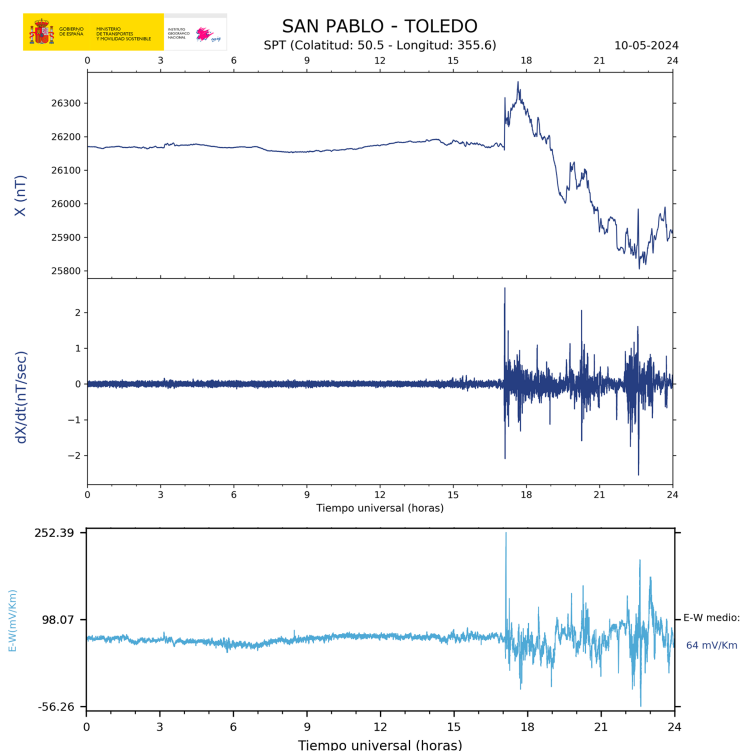


Figura 7: Registro de la componente X del campo magnético y su derivada parcial, junto al registro de la componente E-W de la línea geoelectrica.

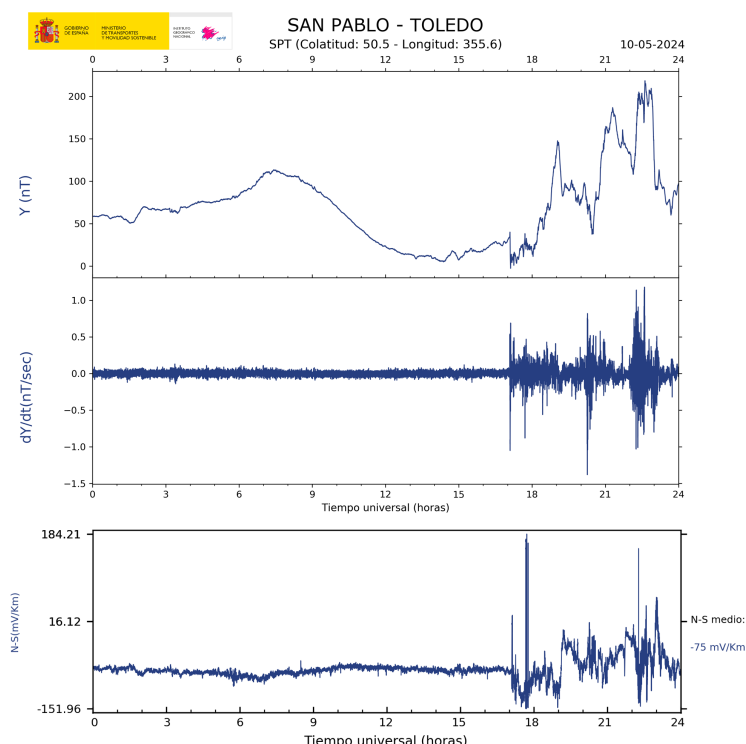


Figura 8: Registro de la componente Y del campo magnético y su derivada parcial, junto al registro de la componente N-S de la línea geoelectrica.

NUEVO APARTADO EN LA PÁGINA WEB DEL IGN

Al igual que se muestran en abierto los datos del campo magnético en la web del Instituto Geográfico Nacional, se ha habilitado una pestaña dentro del apartado de Geomagnetismo, donde se muestra el estado actual del campo eléctrico, actualizado cada 60 minutos (figura 9). Así mismo, se pueden consultar los registros de días anteriores.

La información del estado del campo eléctrico puede consultarse en el enlace: <https://www.ign.es/web/ign/portal/gmt-línea-geopotencial-san-pablo>



Figura 9: Imagen de la sección de Geomagnetismo de la web del IGN.

CONCLUSIÓN

La adquisición de datos geoeléctricos en el Observatorio Geofísico de San Pablo de los Montes tiene como finalidad el análisis de las variaciones del campo eléctrico en el emplazamiento de la línea de geopotencial, así como el estudio de las tormentas geomagnéticas a través del dato geoeléctrico observado, como es el estudio llevado a cabo a partir de la detección de la tormenta ocurrida del 10 al 12 de mayo de 2024. En este contexto, las observaciones del campo eléctrico también tienen el fin de estudiar la correlación entre los datos geomagnéticos y geoeléctricos a través del tensor de impedancias a nivel local, ya que los correspondientes sistemas de adquisición del Observatorio no distan más de 100 m entre sí.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Pablo Pintor Díaz-Hellín (Subdirección General de Vigilancia, Alerta y Estudios Geofísicos, Instituto Geográfico Nacional) su contribución en la producción de las figuras del presente trabajo, así como la realización del diseño y maquetación del mismo.

REFERENCIAS

- [1] Instituto Geográfico Nacional. "Qué son las tormentas geomagnéticas", <https://www.ign.es/web/ign/portal/gmt-que-son-tormentas-geomagneticas> (accessed on 23/09/2024)

Renovação da Rede Nacional de Estações Permanentes GNSS - ReNEP

Innovation of the Portuguese CORS Network - ReNEP

RIBEIRO, Helena ⁽¹⁾; BERNARDES, Ana ⁽¹⁾; MEDEIRO, Ana ⁽¹⁾; PATRÍCIO, Paulo ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Direção-Geral do Território (DGT), Lisboa, Portugal

Autor correspondente: hribeiro@dgterritorio.pt

RESUMO

The Directorate-General for the Territory (DGT) is the entity responsible for establishing and maintaining the National Geodetic Infrastructure. The GNSS CORS Network of DGT – ReNEP, already complete, consists of 42 stations on Portugal mainland, 2 in the Autonomous Region of Azores and 1 in the Autonomous Region of Madeira, being enough for an effective coverage of the national territory.

It is important to highlight that some of these stations belong to international networks of major relevance for the definition of regional and global reference systems, i.e., 6 are part of the EPN (EUREF Permanent Network), 3 of which also belong to the IGS network (International GNSS Service). The data from ReNEP stations contribute for the EPN Densification network and for the European Plate Observing System (EPOS) network.

In the continuous improvement of the service provided to the community, DGT acquired 28 multi-constellation GNSS stations (receiver and antenna) which allow the reception of signals from GPS, GLONASS, Galileo and BeiDou constellations. The network management program was also updated, which allows the processing and dissemination of differential corrections from these 4 constellations, thus increasing the accuracy of positioning in real-time kinematic (RTK) and post-processing.

The installation of the new stations also involved the maintenance of the antenna supports and the change of the respective antenna cable. In some stations, the fixing of these structures did not guarantee the necessary and expected stability, so there was a need to replace and/or relocate them.

Thus, by the end of 2024, all DGT stations will receive and make available differential corrections from GPS, GLONASS and Galileo constellations, with 32 of these stations also providing signal from BeiDou. In this paper, we intend to present the work carried out to improve the quality of ReNEP data.

PALAVRAS-CHAVE

Geodesia, GNSS, GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, RTK, RINEX.

INTRODUÇÃO

A Direção-Geral do Território (DGT) é a entidade responsável pela definição dos Referenciais Geodésicos Nacionais, e pelo estabelecimento e manutenção das Infraestruturas Geodésicas que os materializam, nomeadamente a ReNEP.

A ReNEP é constituída por estações GNSS de observação contínua e difunde dados nos Sistemas de Referência oficiais, em ETRS89 para o continente e em ITRF93 nas regiões autónomas. Fornece produtos para posicionamento em tempo-real, utilizando a técnica RTK, e produtos para pós-processamento com ficheiros RINEX.

Neste trabalho vamos apresentar a evolução da ReNEP, tendo em consideração a recente aquisição de novas estações, antenas e recetores, que captam sinais das constelações GPS, GLONASS, Galileo e BeiDou. Pretende-se com esta modernização da ReNEP, através da disponibilização das correções diferenciais destas 4 constelações de satélites, melhorar os serviços e produtos prestados, aumentando a precisão do posicionamento em tempo-real e a qualidade e fiabilidade da informação disponibilizada pela DGT.

A RENEP

A ReNEP apresenta já a sua configuração final que conta com 42 estações no Continente, 4 na Região Autónoma dos Açores e 1 na Região Autónoma da Madeira. Num total de 47 estações, 44 pertencem à DGT e as restantes 3 resultam de parcerias com outras instituições. Sendo o bastante para uma cobertura eficaz do território nacional (Figura 1), esta cobertura permite a manutenção do referencial geodésico e o apoio a trabalhos de posicionamento em tempo-real e/ou pós-processamento.

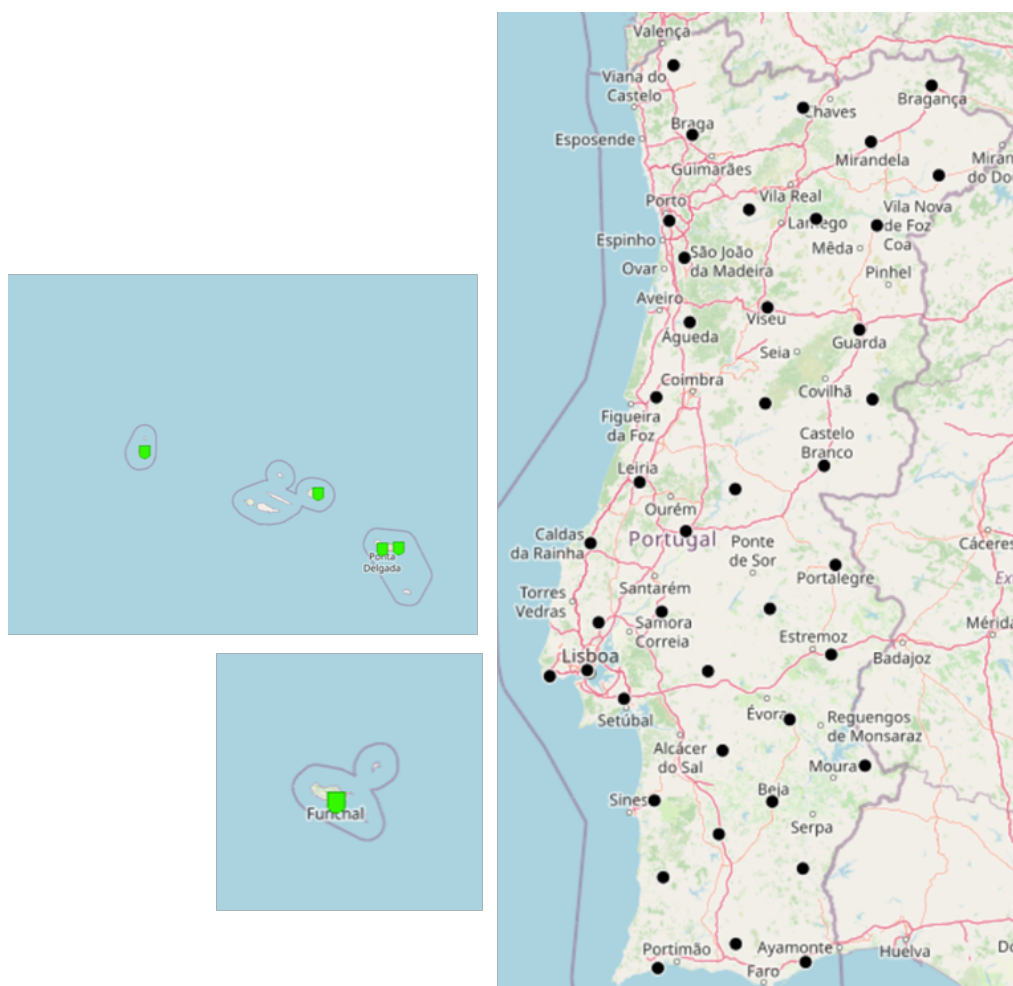


Figura 1: ReNEP - Esquema com a distribuição das Estações Permanentes.

Face à necessidade de acompanhar a constante evolução tecnológica no geral e em particular no âmbito dos posicionamentos GNSS, a DGT tem feito um grande investimento na modernização e atualização dos equipamentos e dos suportes informáticos e de comunicação da ReNEP.

Neste contexto, foram adquiridos vinte e oito (28) novas estações, antenas e recetores GNSS, já com receção dos sinais das constelações de satélites GPS, GLONASS, Galileo e BeiDou, que se traduz em produtos mais abrangentes e precisos e maior rapidez de trabalho para os nossos utilizadores em campo.

Em junho de 2024, a ReNEP contava com 27 estações a receberem sinais das constelações GPS, GLONASS, Galileo e BeiDou, 14 a receberem os sinais de GPS, GLONASS e Galileo e apenas 6 a receberem dados de GPS e GLONASS (Figura 2).

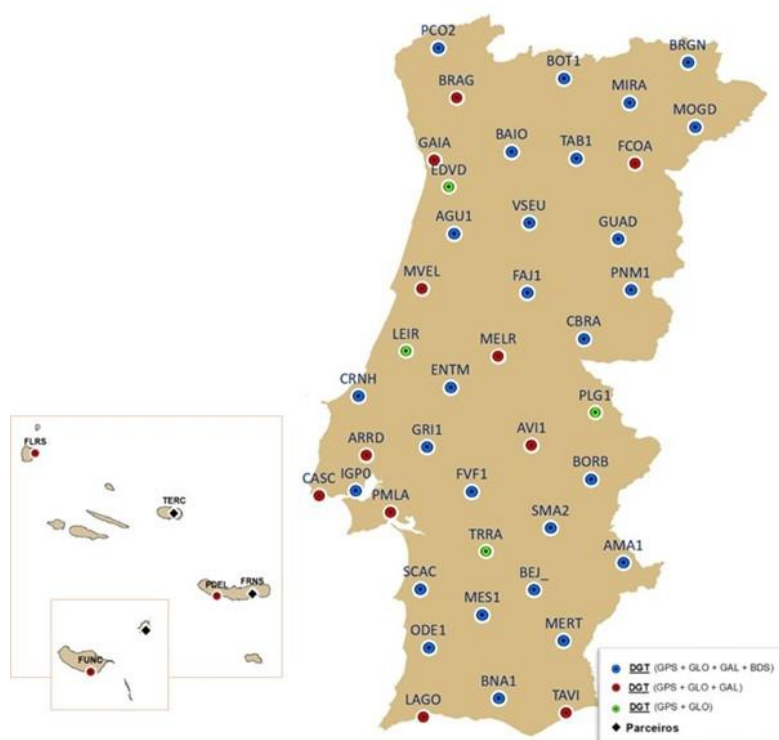


Figura 2: ReNEP - Esquema com os equipamentos GNSS das Estações Permanentes.

Na campanha de instalação dos novos equipamentos a principal ação incidiu na verificação e manutenção dos suportes das antenas, que em muitos casos são de acesso difícil o que torna a manutenção menos frequente que o desejável. Sempre que se verificou instabilidade e/ou degradação do suporte, ou viabilidade de outro local mais favorável, optou-se pela deslocalização da antena GNSS. Apesar de, na maioria dos casos o deslocamento ter sido da ordem dos centímetros, optou-se por criar novas estações sempre que houve alteração de posição. Assim, tentamos evitar eventuais enganos de atribuição de coordenadas “antigas” à “nova” posição.

PRODUTOS DA RENEP

Para pós-processamento, a ReNEP fornece:

- Ficheiros RINEX horários a 5s, disponíveis em <ftp://ftp.dgterritorio.pt/ReNEP>.
- Ficheiros RINEX horários a outras taxas de recolha, a pedido do cliente.
- Para os serviços internacionais parceiros os ficheiros de pós-processamento são:
- Ficheiros RINEX horários e diários a 30s das 6 estações pertencentes à rede EPN e ao IGS e enviados para estas redes.
- Ficheiros RINEX diários a 30s de todas as estações para o projeto European Plate Observation System (EPOS) e para a Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa (FCUL).

No que se refere aos produtos de tempo-real (RTK), são difundidas as correções diferenciais no formato RTCM 3 (e 2.3), sendo possível optar por três tipos de produtos:

- “Base Única Manual” (Single Site) – neste produto o utilizador determina a estação da qual quer receber as correções diferenciais.
- “Estação Mais Próxima” (Nearest Site) - mediante a posição aproximada enviada pelo utilizador, o sistema da rede determina a estação operacional mais próxima dessa localização da qual envia as correções diferenciais.
- “Rede” (Automatic Cell) - tal como no produto anterior, com base na posição aproximada do utilizador, o sistema define

uma célula de pelo menos 4/5 estações mais favoráveis (normalmente as mais próximas), a partir da qual interpola as correções que devolve ao utilizador.

A pensar nos utilizadores com equipamentos mais antigos, a ReNEP continua a difundir estes produtos em RTCM 3 (*extended*) que comportam apenas GPS e GLONASS, em paralelo com os produtos em RTCM 3 (MSM5) que transportam as mensagens de Galileo e BeiDou.

UTILIZADORES DA RENEP

Nos últimos anos tem-se vindo a verificar uma maior diversidade no âmbito dos serviços da ReNEP, nomeadamente, observa-se o crescimento muito significativo de dois grupos muito específicos, a agricultura de precisão e o cadastro simplificado. Em contrapartida, a evolução do número de utilizadores na área da cartografia e topografia mantém-se (Figura 3).

Em junho de 2024 estavam registados cerca de 6 000 utilizadores para o serviço RTK.

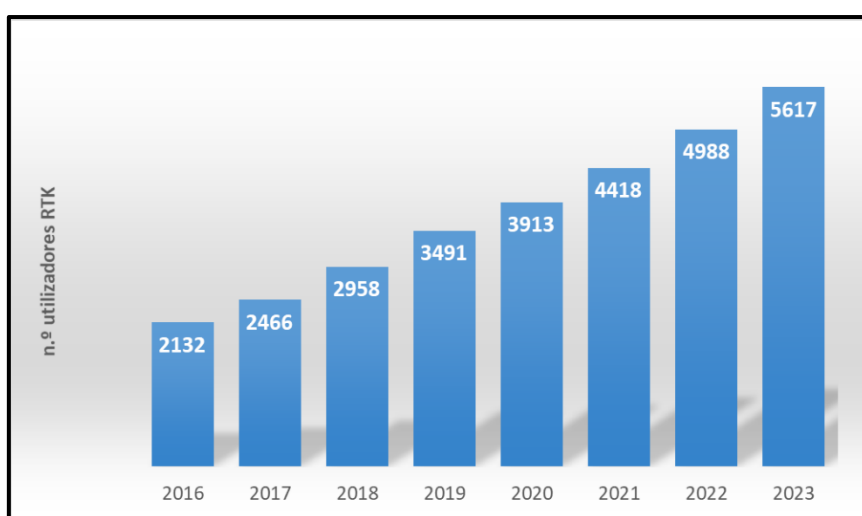


Figura 3: ReNEP - Evolução dos utilizadores de 2016 a 2023.

No que respeita às ligações ao servidor, com o aumento de utilizadores verifica-se igualmente um aumento de ligações, ocorrendo em média, mais de 82 000 ligações mensais aos diversos produtos RTK (Figura 4).

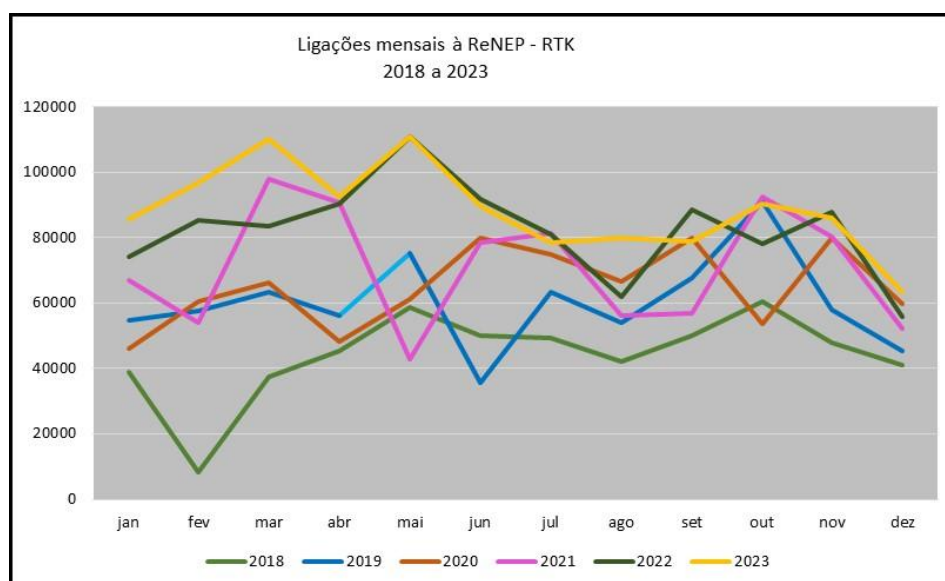


Figura 4: ReNEP - Ligações mensais ao servidor de 2018 a setembro de 2023.

CONCLUSÕES

No espírito de serviço público, a DGT pretende fornecer um serviço de qualidade à comunidade científica e à sociedade em geral, que cada vez mais depende da informação geográfica e exige maior rigor e rapidez na sua localização. Assim, e de forma a acompanhar o contínuo desenvolvimento tecnológico, é imprescindível continuar a investir na atualização e renovação dos equipamentos e infraestruturas de suporte da ReNEP.

Até ao final de 2024 todas as estações da ReNEP devem ter equipamentos que permitem a disponibilização dos dados das constelações Galileo e BeiDou. Com a migração do suporte de comunicações para tecnologia de fibra, aumentou a estabilidade e rapidez na transferência de dados e reduziu significativamente as situações de inoperacionalidade das estações.

Com novos equipamentos e monumentações mais estáveis, estamos nas melhores condições para prosseguir para o ajustamento em bloco da rede GNSS. Daqui resultará uma rede mais uniforme e coesa no que se refere às coordenadas das estações e sua qualidade. Este ajustamento terá como base o ITRF2020, de forma a obtermos uma nova realização para o ETRS89 e coordenadas homogêneas e precisas.

AGRADECIMENTOS

Os nossos agradecimentos vão para todos os municípios, juntas de freguesia e outras instituições que, incansavelmente nos têm apoiado logisticamente e tecnicamente, e possibilitam a existência da ReNEP.

Bringing geodetic products closer to the public: database and viewer of geodetic products of the National Geographic Institute of Spain

ROSILLO, Andrea ⁽¹⁾; AZCUE, Esther⁽¹⁾; LARA, Sonia⁽¹⁾; SÁNCHEZ-SOBRINO, Jose Antonio⁽¹⁾

⁽¹⁾ Instituto Geográfico Nacional, Madrid, Spain.

Corresponding author: becario.arosillo@externomf.es

SUMMARY

Geodesy is the science that studies the shape and dimensions of the Earth and uses different techniques for this purpose. In the National Geographic Institute of Spain (IGNE), many of them have been implemented over the years: Global Navigation Satellite System (GNSS), Very Long Baseline Interferometry (VLBI), gravimetry, tide gauges and levelling, for which we have had data series for decades. In addition, in recent years new sites have been built where these techniques can be combined and worked simultaneously (Core Sites) and even some new ones such as Satellite Laser Ranging (SLR).

In order to share the work carried out during these years and so that the public can use and consult them, a database is in the process of being created. There, the data is stored and, later, it will be used to create a viewer and different web tools. This will allow the user to consult and access the different geodetic products in an easy and intuitive way.

In this contribution we will present the process of creating the database as well as the different products that will be served to the public.

KEYWORDS

Geodesy, database, viewer, National Geographic Institute, GNSS, VLBI, SLR, tide gauges, levelling, gravimetry.

INTRODUCTION

Geodesy involves different techniques to measure and study the shape and dimensions of the Earth. At the National Geographic Institute of Spain (IGNE) [1] many of them have been implemented over the years: GNSS, VLBI, gravimetry, tide gauges and leveling (Figure 1). For most of them, time series of data have been collected for decades.



Figure 1: Geodetic Techniques. GNSS, VLBI, SLR, Levelling, Tide Gauges, Gravimetry and core sites (Images from ggos.org).

In addition, in recent years new sites have been built where these techniques, and even new ones such as SLR, can be combined using local-ties and operated simultaneously (Core Sites). An example of these sites is the Yebes Observatory, located in Guadalajara, Spain. There, GNSS, VLBI, levelling, gravimetry and, in the near future, SLR, are combined with local-ties.

The Yebes observatory is part of the Atlantic Network of Geodynamic and Space Stations (RAEGE) [2]. Along side with three other core sites: the Santa Maria Observatory (Azores) and two future observatories, one in Gran Canaria (Spain) and the other in Flores (Azores). The aim of RAEGE is to create a network of Space Geodetic Stations meeting the requirements of the Global Geodetic Observing System (GGOS) [3] to contribute the monitoring of the geodynamics, due to this, these stations are located on three different tectonic plates.

GOALS

To promote the work carried out during these years by the geodesy department of the IGNE, a database of geodetic products is being created. All the geodetic data and products will be stored in it and subsequently used to create an interactive viewer and different web tools (Figure 2). This will allow the user to consult and access the different geodetic products in an easy and intuitive way.

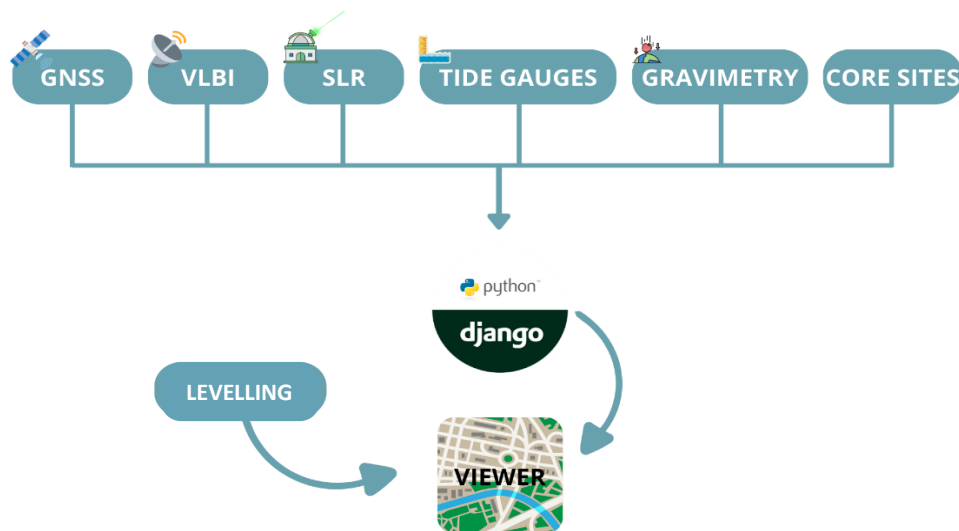


Figure 2: Workflow between database and viewer.

This project will be a further step in GGOS's goal of providing consistent and accessible observations of spatial and temporal changes in the Earth's shape and gravity field.

DATABASE AND GEODETIC PRODUCTS

The geodetic products database has been developed in Django [4], a high-level Python web framework using a PostGIS database type, which allows the use of georeferenced data. Product data are periodically collected in the database, depending on the technique, as well as the different tools, projects or networks.

Depending on the technique, different products are obtained:

- GNSS: station coordinates and velocities, tropospheric data, or time series of such products for different projects. The different projects currently held at IGNE for GNSS are:
 - o IBERRED: a national project processing of all stations in and around the Iberian Peninsula for geodetic and geodynamic purposes. Precise geocentric coordinates and troposphere data (zenith total delay, ZTD) are obtained. Measured data are processed two weeks later, using precise satellite orbit data.
 - o IBERRED rápido: similar to IBERRED but processing the data using rapid ephemerids. Not as accurate coordinates as IBERRED, but obtained sooner.
 - o EUREF: processing of a network of European stations to facilitate access to the European Terrestrial Reference System 89 (ETRS89). Accurate geocentric coordinates and tropospheric data (zenith total delay, ZTD) are obtained.
 - o EUREF rápido: similar to EUREF, but processing the data using rapid ephemerids. Not as accurate coordinates as EUREF, but obtained sooner.
 - o EGVAP: provide Zenith Total Delay (ZTD) estimates in near real time for use in operational meteorology.
 - o EGVAP rápido: similar to EGVAP but using fewer stations, providing results in less time.
 - o HISPARED: historical reprocessing for obtaining coordinates and velocities of IBERRED stations.
- VLBI: station coordinates and Earth Orientation Parameters (EOP). Sessions involving the IGNE antennas can be daily (24 h) or intensive (1 h) and can be separated into Legacy or VGOS type.

- Levelling: altitudes of different points
- Tide gauges: real scale sea level values in millimeters. They can be observed or processed values. For the latter, there are hourly, daily, monthly, annual or integral values.
- Gravimetry: absolute and relative gravimetric data.

VIEWER

In the viewer (Figure 3) the stations will be shown with different symbology depending on the geodetic technique, giving special importance to those points where different techniques coexist (Core Sites). The viewer will be interactive so that the user can select the technique and station of his choice, accessing its data.

For techniques that has a high-density number of stations, such as GNSS, the stations will be grouped in clusters. As soon as the user zooms-in the map, the stations will relocate in their respective locations. This will facilitate the visualization of the stations in the map, which, otherwise, will be difficult.



Figure 3: Geodetic products viewer of the IGNE. GNSS selected.

The viewer will offer several functionalities:

- Comparing the same products obtained with different techniques or obtained for different projects of the same technique for an established period of time.
- Compare products obtained at the National Geographic Institute of Spain with those obtained by other analysis centers or references (e.g. IERS).
- View historical time series of data for different products in an interactive way.
- Know the different instruments that have been part of the observation point.
- Interactive tools with the user: "a la carte product".
- Download different files such as RINEX, time series text files (or in png format).

In addition, for data obtained in real time, such as the Real Time Positioning Service, its availability will be shown at the time of collection, as it is already on the IGNE website [5].

CONCLUSION

From the collaboration of the different working groups that studies the geodetic techniques in the IGNE, it has been able to create a complete and daily updated database. With this database, an interactive and functional viewer is being developed. The viewer will allow the user to obtained quality data quickly and to learn about it.

Aside of the data itself, the user will be able to see the metadata of the data, new information of the different techniques, and how it is combined with each other.

The main goal of this project is to give geodesy a better visibility, not only in the scientific community but also with people that don't know about it yet and wants to learn. This will also lead to a better understanding of the shape of the Earth, how the tectonic plates move and how the Spanish land moves within the Eurasian plate.

REFERENCES

- [1] National Geographic Institute of Spain, ign.es
- [2] Red Atlántica de Estaciones Geodinámicas y Espaciales, RAEGE.eu – RAEGE
- [3] Global Geodetic Observing System (GGOS), Global Geodetic Observing System | GGOS
- [4] The web framework for perfectionists with deadlines | Django, djangoproject.com
- [5] Real Time Positioning Service of the National Geographic Institute of Spain, Información del servicio - Instituto Geográfico Nacional (ign.es)

Monitoring of hydraulic infrastructures using satellite radar interferometry: SIAGUA project

RUIZ-ARMENTEROS, Antonio Miguel ^(1,2,3); MARCHAMALO-SACRISTÁN, Miguel ⁽⁴⁾; LAMAS-FERNÁNDEZ, Francisco ⁽⁵⁾; HERNÁNDEZ-CABEZUDO, Álvaro ⁽⁶⁾; FERNÁNDEZ-LANDA, Alfredo ⁽⁶⁾; DELGADO-BLASCO, José Manuel ⁽³⁾; BAKON, Matus ^(7,8); LAZECKY, Milan ^(9,10); PERISSIN, Daniele ^(11,12); PAPCO, Juraj ⁽¹³⁾; CORRAL, Gonzalo ⁽¹⁴⁾; MESA-MINGORANCE, José Luis ⁽¹⁾; GARCÍA-BALBOA, José Luis ⁽¹⁾; DA PENHA PACHECO, Admilson ⁽¹⁵⁾; JURADO-RODRIGUEZ, Juan Manuel ⁽¹⁶⁾; SOUSA, Joaquim J. ^(17,18)

⁽¹⁾ Department of Cartographic, Geodetic and Photogrammetry Engineering, University of Jaén, Jaén, Spain

⁽²⁾ Centre for Advanced Studies in Earth Sciences, Energy and Environment (CEACTEMA), University of Jaén, Jaén, Spain

⁽³⁾ Research Group RNM-282 Microgeodesia Jaén, University of Jaén, Jaén, Spain

⁽⁴⁾ Topography and Geomatics Lab. ETS ICCP, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, Spain

⁽⁵⁾ Department of Civil Engineering, University of Granada, Spain

⁽⁶⁾ Detektia Earth Surface Monitoring S.L., Spain

⁽⁷⁾ insar.sk s.r.o., Slovakia

⁽⁸⁾ Department of Finance, Accounting and Mathematical Methods, Faculty of Management and Business, University of Presov in Presov, Slovakia

⁽⁹⁾ School of Earth and Environment, University of Leeds, United Kingdom

⁽¹⁰⁾ IT4Innovations, VSB-TU Ostrava, Czechia

⁽¹¹⁾ Raser Limited, Hong Kong, China

⁽¹²⁾ CIRGEO, Università degli Studi di Padova, Italy

⁽¹³⁾ Department of Theoretical Geodesy and Geoinformatics, Slovak University of Technology in Bratislava, Slovakia

⁽¹⁴⁾ Inteligencia Geotécnica SpA, Chile

⁽¹⁵⁾ Center for Technology and Geosciences, Department of Cartographic and Surveying Engineering, Federal University of Pernambuco, Recife, Brazil

⁽¹⁶⁾ Department of Computer Science, University of Jaén, Spain

⁽¹⁷⁾ Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, Portugal

⁽¹⁸⁾ INESC-TEC - INESC Technology and Science, Porto, Portugal

Corresponding author: amruiz@ujaen.es

SUMMARY

Effective monitoring of water infrastructure and surrounding areas is essential to ensure their safety and optimal functioning. With the increasing importance of water supply systems and the construction of linear structures such as dams, the need to adapt these structures to changing conditions is becoming more pressing. Proper risk management of dams is essential as their failure can have serious economic and social consequences. In this context, satellite radar interferometry (InSAR), particularly through the European Ground Motion Service (EGMS), provides a valuable solution for monitoring surface deformations with high accuracy and without needing fieldwork. EGMS uses Sentinel-1 satellite data to provide accurate deformation measurements, allowing the identification of problems such as subsidence and landslides that can affect the stability of infrastructure. The SIAGUA project in Spain is an example of how EGMS can be used to monitor dams and surrounding areas, providing valuable information for dam management in the region. This technology not only improves monitoring efficiency but also helps prevent economic losses and public safety risks by identifying potential problems before they become critical threats. This paper presents the SIAGUA project, which is dedicated to the monitoring of hydraulic infrastructures using multitemporal InSAR. It uses tools such as EGMS and specific processing with satellite images of different resolutions.

KEYWORDS

Spanish-Portuguese Assembly, Geodesy, InSAR, Risk Management, Dam monitoring, European Ground Motion Service, EGMS, Satellite Radar Interferometry, Deformations, Earth Observation.

INTRODUCTION

Water infrastructure, including dams, plays a critical role in ensuring public safety, economic stability, and the effective management of water resources. As populations increase and industrial activity expands, the demand for reliable water supply and control systems intensifies. Dams and large ponds, in particular, are of critical importance for the provision of water storage,

flood control, energy generation, and irrigation. However, a significant number of these structures were constructed decades ago and are now confronted with the challenges inherent to aging infrastructure, which can potentially compromise their integrity and functionality. On the other hand, most modern dams and large ponds are subject to settlement and movement due to material consolidation processes, which can be significant. Environmental factors, such as subsidence, landslides, and shifting geological conditions, further exacerbate the risks associated with aging infrastructure. These concerns underscore the urgent need for more advanced, efficient, and continuous monitoring systems to ensure the ongoing safety and operational stability of hydraulic infrastructure [1-4].

The conventional techniques for surveillance of water infrastructure, including periodic on-site inspections and in situ measurements, are inherently constrained by several factors. These methods are frequently labor-intensive, time-consuming, and constrained by geographical limitations. It is not feasible, or difficult, to obtain continuous, real-time data through fieldwork, which may also fail to detect subtle but significant changes in the structural integrity of a dam or surrounding terrain. Consequently, these limitations result in gaps in the monitoring process, thereby increasing the probability that critical deformations or warning signs of potential failure may remain undetected until it is too late. Consequently, there is an increasing recognition of the necessity for the implementation of advanced remote sensing technologies that can overcome these limitations and provide a more comprehensive and accurate assessment of infrastructure conditions. In this context, satellite radar interferometry (InSAR) has emerged as a transformative tool for infrastructure monitoring. InSAR technology employs radar signals from satellites to measure ground movements with millimeter precision, thus enabling the discernment of surface deformations that may signify structural deficiencies or instability [5-7]. One of the principal advantages of InSAR over traditional monitoring techniques is its capacity to cover extensive geographical regions on an uninterrupted basis, obviating the necessity for ground-based instrumentation. This renders it especially beneficial for the surveillance of remote or inaccessible regions, where on-site inspections are impractical, or for those dams that do not have any type of control instrumentation installed. Furthermore, InSAR data can be collected with regularity and consistency, offering near real-time insights into infrastructure conditions. This is vital for prompt decision-making in risk management and maintenance planning.

The European Ground Motion Service (EGMS) is of paramount importance for the implementation of InSAR for monitoring infrastructures. By employing satellite data from the Sentinel-1 mission, the EGMS offers detailed ground motion maps that document deformations across the European continent. These maps are instrumental in identifying areas of subsidence, uplift, and other forms of terrain movement that could impact the structural integrity of dams and other hydraulic infrastructures. The incorporation of EGMS data into infrastructure monitoring systems signifies a substantial advancement in the capacity to discern nascent indications of potential failure, thereby facilitating more proactive maintenance and risk mitigation endeavors. Furthermore, the historical data archives from Sentinel-1 permit long-term analysis (since 2015), thereby facilitating the assessment of infrastructure performance over extended periods and under varying environmental conditions [8-10].

This work aims to demonstrate the use of InSAR technology, particularly through the EGMS, for monitoring hydraulic infrastructures. The focus is on the SIAGUA project (New Generation of Water Cycle Infrastructure Monitoring and Control Integrating Satellite Data, In-situ Monitoring, and Expert Judgment) in Spain. The SIAGUA project represents a comprehensive approach to water infrastructure monitoring, integrating InSAR with in situ data to enhance the management and safety of dams. This paper examines the methodologies utilized in the project, some findings obtained, and the potential implications for broader infrastructure monitoring endeavors. Moreover, it demonstrates how the insights derived from satellite-based monitoring can be utilized to enhance risk management, prevent economic losses, and safeguard public safety.

DATA AND METHOD

Differential InSAR (DInSAR) is a remote sensing technique that utilizes radar images captured by satellites to measure ground motion with millimeter precision [11-12]. Its core principle is interferometry, where two or more Synthetic Aperture Radar (SAR) images are combined to extract information about the phase difference between them. This phase difference reveals variations in the distance between the satellite and the Earth's surface, allowing precise measurements of ground movement. The process begins when a satellite equipped with a radar antenna sends microwave pulses toward the Earth and records the reflected signals. Two SAR images of the same area, taken at different times, are superimposed to create an interferogram. This displays the phase difference between the signals reflected from the surface. The phase difference is directly proportional to the change in distance between the satellite and the ground. If the ground moves between the two acquisitions, this movement is reflected in the interferogram, allowing the detection of ground displacements with millimeter-level accuracy. DInSAR is a powerful tool but has several limitations. It measures relative, not absolute, motion, so external data such as Global Navigation Satellite System (GNSS)

measurements are required to reference InSAR data to an absolute framework. Additionally, SAR satellites typically have side-looking geometry, limiting their sensitivity to north-south ground movements. Atmospheric variations, such as water vapor, can affect radar signals, introducing errors in displacement measurements, which necessitates atmospheric correction techniques. Another issue is signal decorrelation, where changes in the radar reflections—due to factors like vegetation growth or moisture variations—degrade measurement precision, particularly in areas with rapidly changing surface conditions. Despite these challenges, DInSAR has numerous applications, especially in the monitoring of hydraulic infrastructures like dams. It can detect small deformation patterns in dam structures, identifying potential issues in their early stages. Additionally, it can monitor ground movement around reservoirs to prevent landslides and assess slope stability, essential for preventing accidents and ensuring public safety.

Multi-temporal InSAR (MT-InSAR) analysis is a powerful technique for measuring surface deformations over time using SAR imagery. This method overcomes the limitations of DInSAR and involves processing a series of SAR images acquired at different times over the same area to detect and quantify ground movements [13-16]. The process begins with the acquisition and preprocessing of multiple SAR images from the study area over time. These images are preprocessed to correct geometric and phase errors. Next, pairs of SAR images taken at different times are used to generate interferograms. The next step involves selecting measurement points in the interferograms that exhibit a stable phase signal over time. These points, known as persistent scatterers (PS) or distributed scatterers (DS), serve as measurement points for deformation analysis. PS are stable points typically corresponding to man-made objects or rock outcrops, such as buildings, bridges, or exposed rock outcrops, that consistently reflect radar signals, enabling highly accurate displacement measurements, often at millimeter-level precision. DS, on the other hand, are groups of pixels with medium or low reflectivity, that is, represent areas with homogeneous scattering characteristics such as uncultivated land or desert areas. These DS scatterers, which collectively exhibit homogeneity, allow for broader terrain coverage and are used where PS density is low. Once these PS/DS scatterers are identified, the phase signal for each measurement point is analyzed over time to create a deformation time series. This time series describes the displacement of each point along the satellite's line of sight (LOS) as a function of time. Various time series analysis techniques are then applied to identify deformation trends over time. These trends can include stable deformation, where no significant movements are observed, linear deformation, where ground movement follows a constant linear trend over time, and nonlinear deformation, where ground movement accelerates or decelerates, often linked to complex processes like landslides or subsidence due to groundwater extraction. Changes in the rate of deformation may also be detected, indicating a shift in the underlying deformation process, which can be identified by observing breakpoints or sudden changes in the slope of the time series.

EGMS is a continental-scale ground motion monitoring service that uses SAR data from the Copernicus Sentinel-1 satellites [8-10]. This service provides millimeter-level accuracy in measuring ground deformations, covering the entirety of Europe with annual updates. The data acquisition process for EGMS relies on the SAR images captured by the Sentinel-1 satellites, which orbit the Earth in a near-polar trajectory. These satellites acquire images in two distinct geometries: ascending (south to north) and descending (north to south). The EGMS benefits from a revisit frequency of 6 days, thanks to the operation of two Sentinel-1 satellites (A and B), enabling more frequent monitoring of ground deformations. Unfortunately, from December 2021 only data from Sentinel-1A is available reducing the frequency of acquisition from that date to 12 days. The open and free availability of Sentinel-1 data ensures that EGMS is accessible to a broad range of users. The initial update to the EGMS spanned 2015 to 2021, which is no longer available as a standalone data release on the Web Explorer (<https://egms.land.copernicus.eu/>, Figure 1)). Subsequently, the EGMS update strategy has been modified to encompass a five-year moving window approach, with the current update encompassing the period from 2018 to 2022. The subsequent update will encompass the period from 2019 to 2023 (available from October 2024), with subsequent updates occurring at five-year intervals. The most recent EGMS release can be accessed and downloaded by users via the Web Explorer. Moreover, the preceding data version is accessible for download.

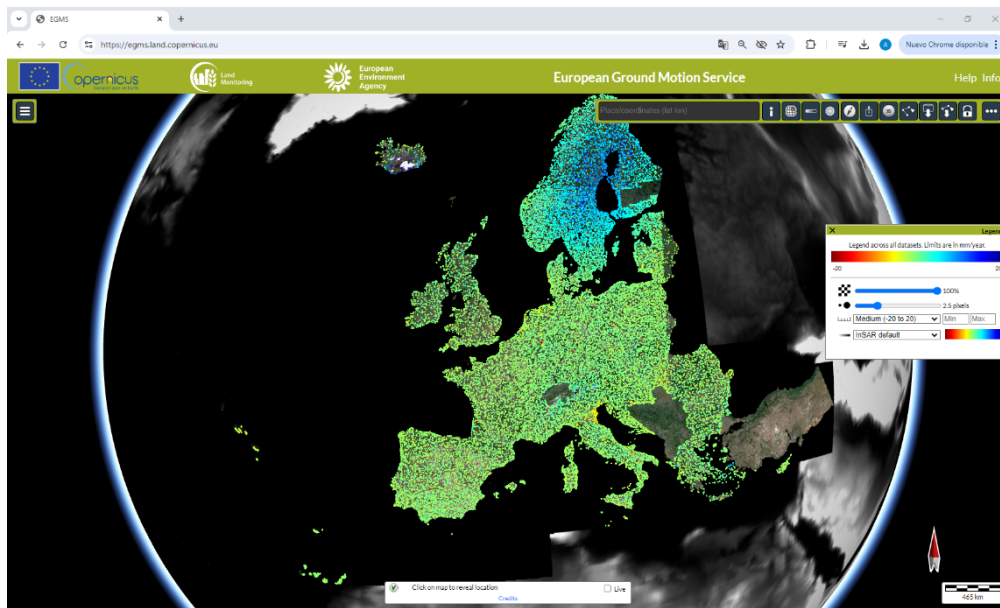


Figure 1: Web Explorer (<https://egms.land.copernicus.eu/>) for accessing the EGMS data.

To measure ground deformations, EGMS employs the technique of MT-InSAR identifying both PS and DS scatterers. After identifying the scatterers, EGMS estimates ground displacement by analyzing the phase difference in the interferograms. This analysis enables the estimation of ground displacement in the LOS direction, which can then be used to generate ground motion velocity maps. The next stage in the process involves applying corrections and ortho-rectification. Atmospheric correction is performed to minimize errors caused by atmospheric variations, and GNSS data are used to calibrate the EGMS products, ensuring the provision of absolute rather than relative deformation measurements. Additionally, a Digital Elevation Model (DEM) is used to correct geometric distortions in the SAR images and generate ortho-rectified products. EGMS produces three levels of products: Basic (L2a), Calibrated (L2b), and Ortho (L3). The Basic products consist of measurement point maps with information on LOS displacement, average velocity, and time series. Calibrated products are similar to the Basic ones but include additional corrections and GNSS calibration to provide absolute deformation measurements. Both Basic and Calibrated products are provided at the full spatial resolution of Sentinel-1, which is 5 m by 20 m, providing detailed ground motion information, particularly in urban areas. Combining data from the ascending and descending orbits also enables EGMS to provide a more comprehensive view of ground motion, including both vertical and horizontal components. Ortho products offer maps of vertical and E-W horizontal deformation velocities on a regular grid with a resolution of 100 m, which is not suitable for the analysis of small areas. In this project, we use an ad-hoc decomposition [17] which allows us to obtain a point density in the Ortho products similar to that of the Basic and Calibrated products. Through the processing of Sentinel-1 images using these techniques, EGMS delivers valuable information for a wide range of applications, including infrastructure monitoring, geological risk management, and urban planning.

SIAGUA is a Spanish research project led by the University of Jaén and the Polytechnical University of Madrid to monitor the structural health of water infrastructures from space. It represents an ambitious effort to enhance the safety and management of water cycle infrastructures through interdisciplinary collaboration and the integration of cutting-edge technologies. SIAGUA integrates advanced technologies by combining InSAR with geotechnical monitoring data and expert insights to create a comprehensive monitoring system. Mathematical modeling is used to study the expected subsidence behavior of the dams and validate the InSAR measurements. Additionally, the project explores the use of artificial intelligence (AI) algorithms for the early detection of anomalies in the time series of deformation. Early detection of abnormal movements can prevent catastrophic failures and aid in planning maintenance. Critical areas for deformation analysis include the dam body, which is examined for settlements, horizontal displacements, internal deformations, and the dam's foundation, where stability and interaction with the dam body are assessed, particularly concerning groundwater influence and material consolidation. Adjacent slopes are also monitored for potential landslides that could compromise the infrastructure's integrity, and the reservoir area is analyzed to understand the effects of filling and emptying on the dam and its surroundings. By examining dam behavior over time, the SIAGUA project contributes to optimizing resource allocation and enhancing the design of future hydraulic infrastructures. It focuses on applying the latest advancements in MT-InSAR to measure surface deformations over time and monitor the structural integrity of several dams and large ponds in Andalusia, southern Spain, selected due to their significance for water security and the interest expressed

by entities such as the Guadalquivir River Basin Authority (CHG) and the Andalusian regional government (Figure 2). The selection criteria are based on the availability of historical data, susceptibility to deformation, and the criticality of the infrastructures. Special attention is given to dams constructed with loose materials, which tend to consolidate over time, and areas where seismic activity or aquifer exploitation might affect dam stability. As indicated above, critical monitoring areas include the dam body and foundations, as well as adjacent slopes, which are monitored to detect movements that could compromise structural integrity. Specific dams such as La Viñuela, Vadomojón, Martín Gonzalo II, Canales, Giribaile, and Siles, among others, are part of the study. Regarding large ponds, Cadimo, Melendo, La Ramblilla, and La Berduga were selected of interest.



Figure 2: Location of dams and large ponds in Andalusia selected for SIAGUA project.

SIAGUA project uses EGMS to provide a historical analysis of the areas of interest, including not only the dam body but also the surrounding areas. The analysis of deformation time series reveals trends, including stable, linear, and nonlinear deformations, which are critical for understanding surface processes like landslides or subsidence. SIAGUA also integrates advanced image processing techniques, such as those offered by SARPROZ software for processing the most recent SAR data, which allows the analysis of interferogram time series using algorithms based on persistent scatterers (PS) and Quasi-PS, and validating their analysis using mathematical models and external validation sources. For those areas of analysis older enough, historical SAR data from earlier missions like ERS-1/2 and Envisat are also analyzed. Other SAR data such as X-band from PAZ, TerraSAR-X, and Tandem-X, are also used for specific dams, providing results with a higher spatial resolution. In addition, high-resolution (10 cm) DEMs obtained through UAV photogrammetry (DJI Mavic 3 Multispectral UAV) are obtained to enhance InSAR processing.

RESULTS AND DISCUSSION

InSAR's significance in dam management is emphasized through its ability to facilitate early deformation detection. This technology can identify millimeter-scale movements, allowing for early warnings of potential issues before they escalate into critical problems. Continuous monitoring over vast areas is a great advantage, providing comprehensive insights into dam behavior and surrounding environments over time. Furthermore, InSAR serves as a complementary tool to traditional monitoring methods, enhancing the understanding of deformations and their underlying causes. As an example of the EGMS results in the SIAGUA project, Figures 3 through 6 present the outcomes of MT-InSAR analyses conducted on the Giribaile Dam for 2018–2022. Specifically, Figures 3 and 4 display the average deformation velocity maps in the LOS direction for ascending and descending orbits. The high density of measurement points detected over the dam and adjacent areas is evident in both figures. This density of points enables a detailed analysis of the dam body's movements across its various sections. Both figures show a deformation time series in the lower left corner for the point at the dam crest, marked with a circle. Beyond the linear velocity of the movement, calculated for the entire 2018–2022 period, the time series allows for a detailed analysis of the types of movements (both linear and non-linear) occurring at that point, facilitating the detection of accelerations, decelerations, stable periods, movement shifts, and other trends.



Figure 3: Map of the average LOS velocity using ascending Sentinel-1 imagery processing for 2018–2022 over the Giribaile Dam (EGMS).

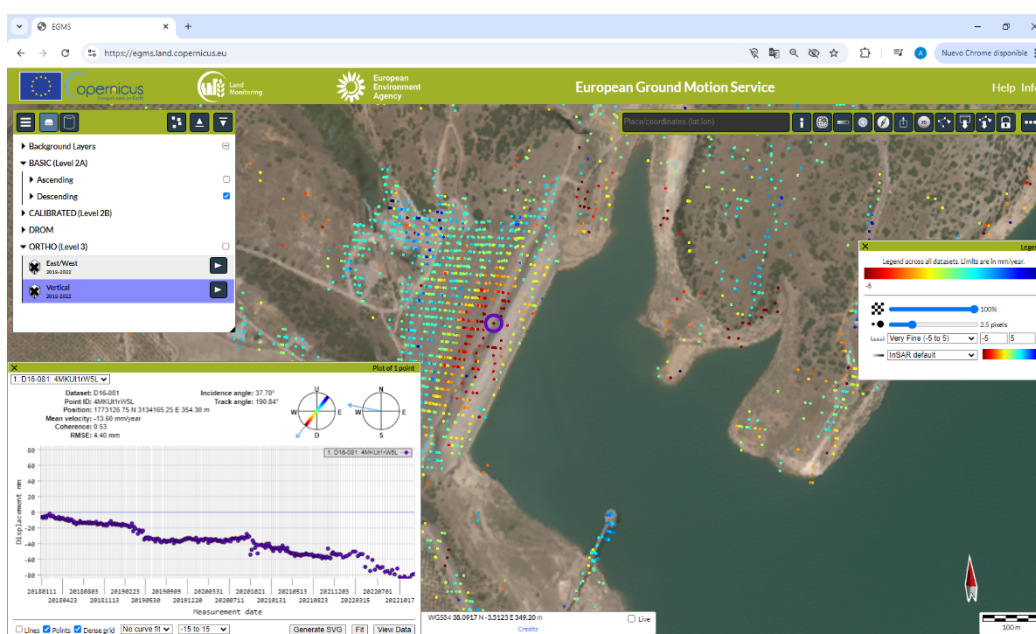


Figure 4: Map of the average LOS velocity using descending Sentinel-1 imagery processing for 2018–2022 over the Giribaile Dam (EGMS).

Figures 5 and 6 display the movements decomposed into the vertical (zenith-nadir) and horizontal (E-W) directions, respectively. While EGMS provides this decomposition of movement, the results are provided on a 100 m x 100 m grid. This resolution is useful for large areas but has limited applicability for monitoring small infrastructures or linear structures. It can be observed that there are only about 10 measurement points over the dam body, which represent the averages of all points from ascending and descending modes within 100 m x 100 m grid cells.

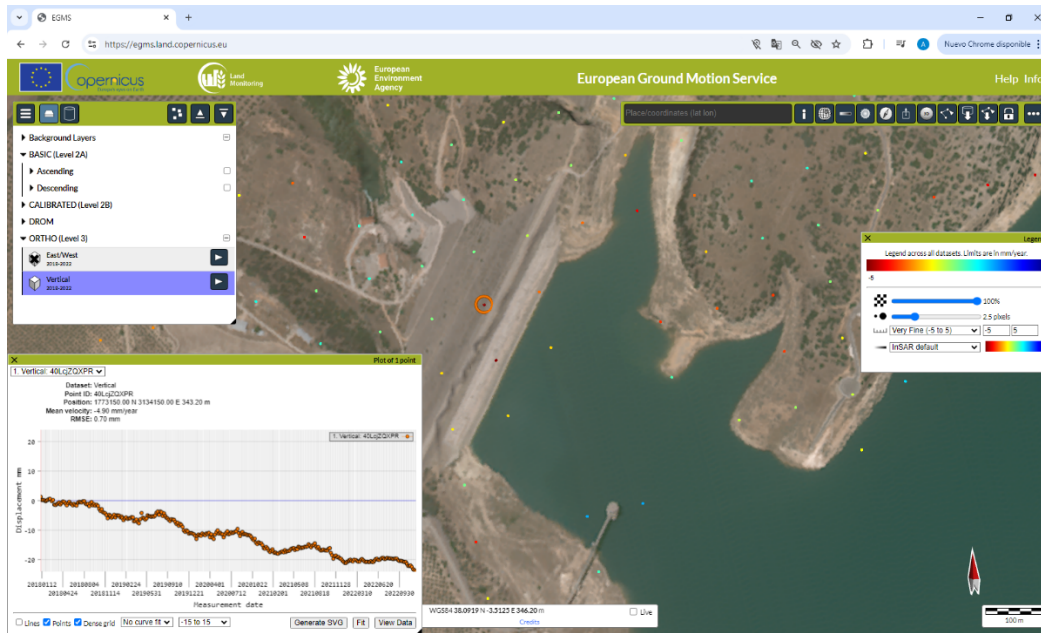


Figure 5: Map of the average velocity in the vertical direction (up-down) using Sentinel-1 imagery processing for 2018–2022 over the Giribaile Dam (EGMS).

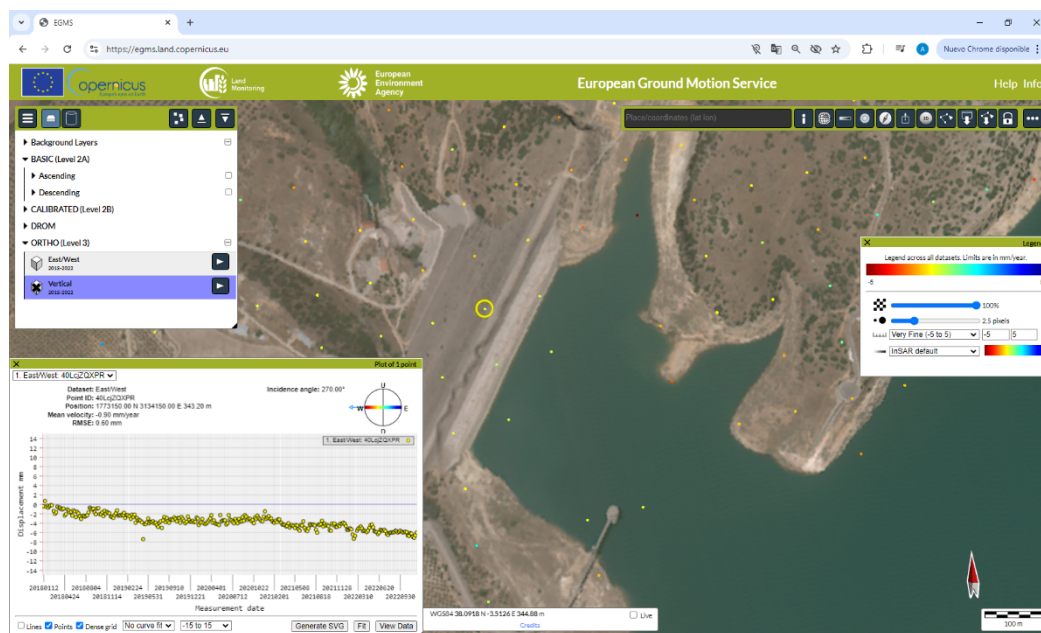


Figure 6: Map of the average velocity in the E-W horizontal direction (up-down) using Sentinel-1 imagery processing for 2018–2022 over the Giribaile Dam (EGMS).

In SIAGUA, we use an ad hoc-calculated motion decomposition with a measurement point density similar to the points detected in the ascending and descending directions [17] developed by Detektia, a collaborator on the project, and integrated into its eyeRADAR solution for analyzing the InSAR results. This decomposition allows us to better utilize the vertical and E-W horizontal movements based on the ascending/descending data provided by EGMS. Figures 7 and 8 illustrate the integrated decomposition in the eyeRADAR solution developed by Detektia. In both figures, the improvement in the point density is evident, and in particular, it can be seen in the time series of one of the points located at the dam's crest. By comparing Figures 5 and 6 with Figures 7 and 8, the limitations of the resolution of EGMS for Ortho products become clear.

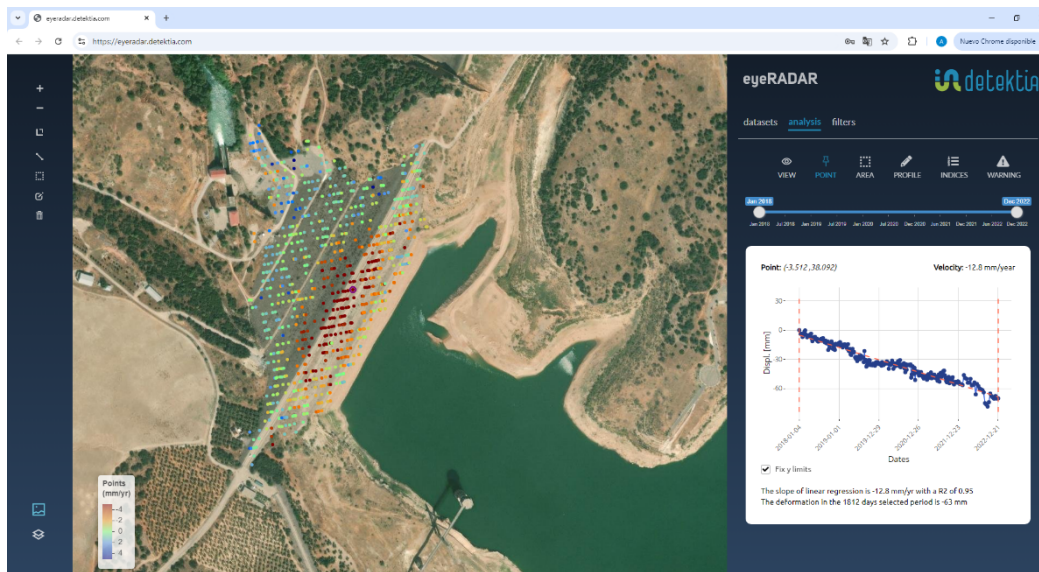


Figure 7: Map of the average velocity in the vertical direction (up-down) using Sentinel-1 imagery processing for 2018–2022 over the Giribaile Dam (EGMS), (Detektia's solution).

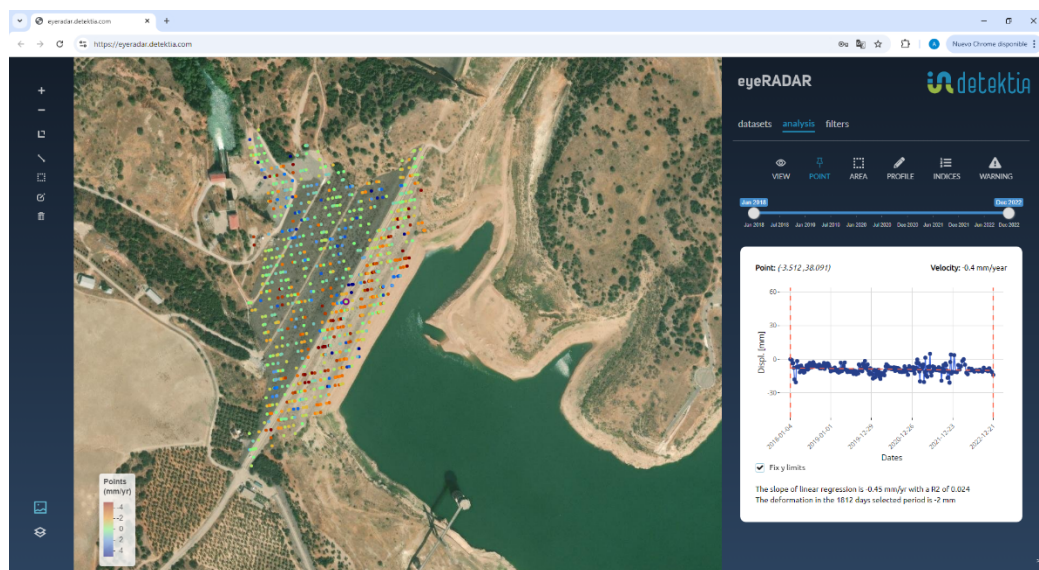


Figure 8: Map of the average velocity in the E-W horizontal direction (up-down) using Sentinel-1 imagery processing for 2018–2022 over the Giribaile Dam (EGMS), (Detektia's solution).

EGMS products also play a crucial role in assessing risks to infrastructure in surrounding areas, particularly concerning landslides and subsidence. For example, Figure 9 illustrates a small landslide affecting a residential area on one of the slopes of the La Viñuela dam. This figure presents the map of average LOS velocity in ascending mode. While MT-InSAR analysis with EGMS offers numerous advantages, as demonstrated, it also presents some challenges. These include limitations in data resolution, such as the spatial resolution of 5 m x 20 m from Sentinel-1, which may not adequately detect localized movements. Additionally, the lateral acquisition geometry of satellites can lead to discontinuous coverage in areas with pronounced topography, particularly in mountainous regions. Furthermore, InSAR measures displacement with Sentinel-1 along the LOS direction hinders the detection of north-south movements.

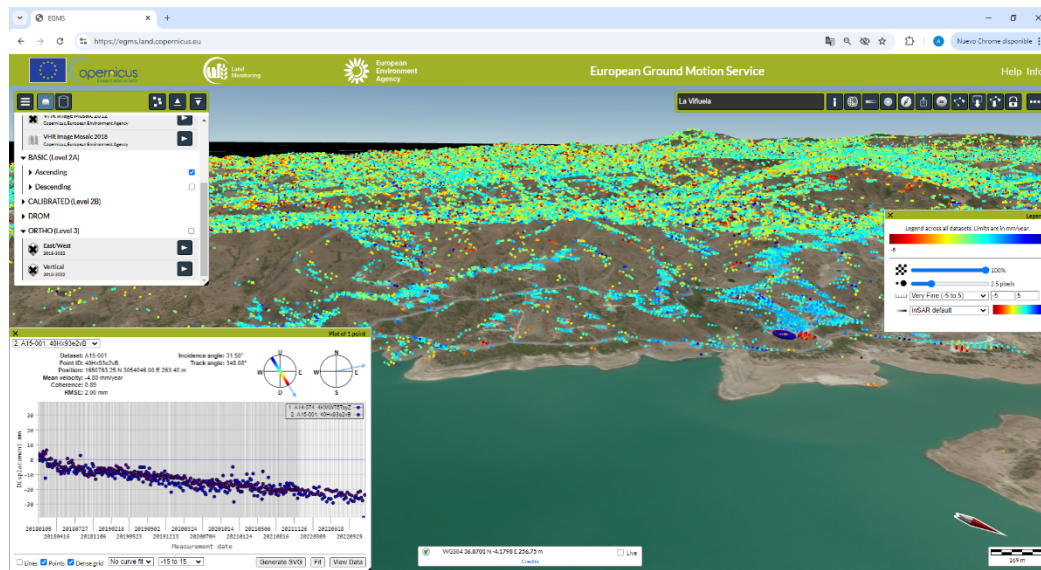


Figure 9: Map of the average LOS velocity using ascending Sentinel-1 imagery processing for 2018–2022 in the vicinity of La Viñuela dam (EGMS).

CONCLUSIONS

The findings presented in this study underscore the transformative potential of InSAR as a pivotal technology for the monitoring of hydraulic infrastructures. The SIAGUA project exemplifies how integrating advanced remote sensing techniques with traditional monitoring approaches can enhance the management and safety of dams in the context of evolving environmental conditions. Through the application of MT-InSAR and the EGMS, significant progress has been made in identifying and quantifying surface deformations that pose risks to structural integrity. The results from the analysis, particularly those related to the selected dams in the project, reveal that InSAR technology can detect small movements at a millimeter scale, thereby facilitating early warnings of potential issues. This capability is crucial for proactive maintenance and risk management, enabling authorities to address concerns before they escalate into critical failures. Furthermore, the detailed deformation time series obtained through the project provides valuable insights into the dynamics of dam behavior, which can be leveraged for informed decision-making regarding infrastructure upkeep. However, the study also highlights several challenges associated with the application of InSAR, including data resolution limitations and the complexities introduced by varying topographies. The findings emphasize the necessity for continued refinement of data acquisition techniques and analytical methods to maximize the effectiveness of InSAR in infrastructure monitoring. In summary, the SIAGUA project demonstrates that the integration of satellite radar data into dam management strategies not only enhances the understanding of structural health but also contributes to the prevention of economic losses and safeguarding public safety. As the demand for reliable water management systems continues to grow, the deployment of innovative monitoring technologies like InSAR will be essential for addressing the challenges posed by aging infrastructure and environmental change.

ACKNOWLEDGMENTS

The velocity maps presented in some figures are derived from the EGMS Service (<https://egms.land.copernicus.eu/>). This work is supported by: a) the SIAGUA research project PID2021-128123OB-C21 and PID2021-128123OB-C22 funded by MCIN/AEI/10.13039/501100011033/FEDER, EU, b) the POAIUJA-2023/2024 and CEACTEMA of the University of Jaén, and c) the RNM-282 Microgeodesia Jaén research group of the Junta de Andalucía. The authors express their gratitude for the support received from the Dirección General de Infraestructuras del Agua (Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Desarrollo Sostenible de la Junta de Andalucía), Confederación Hidrográfica del Guadalquivir and TYPESA for the information provided regarding the dams and validation data.

REFERENCES

- [1] Estrela, T., M.A. Pérez-Martin, and E. Vargas (2012): "Impacts of climate change on water resources in Spain". *Hydrological Sciences Journal*, 57, 6, 1154–1167.

- [2] Forero-Ortiz, E., E. Martínez-Gomariz, and R. Monjo (2020): "Climate Change Implications for Water Availability: A Case Study of Barcelona City". *Sustainability*, 12, 1779.
- [3] ICOLD (2003): "Bulletin on risk assessment in dam safety management". International Commission on Large Dams.
- [4] Fluixá-Sanmartín, L., A. Altarejos García, I. Morales Torres, and I. Escuder Bueno (2018): "Climate change impacts on dam safety". *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18, 9, 2471-2488.
- [5] Marinkovic, P., V.B.H. Ketelaar, F.J. van Leijen, and R.F. Hanssen (2008): "InSAR quality control: analysis of five years of corner reflector time series". Fifth International Workshop on ERS/Envisat SAR Interferometry, 'FRINGE07', Frascati, Italy, 26 Nov-30 Nov 2007, Noordwijk, 1-8. ESA Communication Production Office.
- [6] Peltier, A., M. Bianchi, E. Kaminski, J.-C. Komorowski, A. Rucci, and T. Staudacher (2010): "PSInSAR as a new tool to monitor pre-eruptive volcano ground deformation: Validation using GPS measurements on Piton de la Fournaise". *Geophysical Research Letters*, 37, L12301, doi:10.1029/2010GL043846.
- [7] Ferretti, A., A. Tamburini, F. Novali, A. Fumagalli, G. Falorni, and A. Rucci (2011): "Impact of high resolution radar imagery on reservoir monitoring". *Energy Procedia*, 39, 1, 8-20. ISSN: 1876-6102.
- [8] Crosetto, M., L. Solari, M. Mróz, J. Balasis-Levinsen, N. Casagli, M. Frei, A. Oyen, D.A. Moldestad, L. Bateson, V. Guerrieri, and V. Comerchi (2020): "The Evolution of Wide-Area DInSAR: From Regional and National Services to the European Ground Motion Service". *Remote Sens.*, 12, 2043. <https://doi.org/10.3390/rs12122043>.
- [9] Crosetto, M., L. Solari, J. Balasis-Levinsen, L. Bateson, N. Casagli, M. Frei, A. Oyen, D.A. Moldestad, and M. Mróz (2021): "Deformation monitoring at European scale: the Copernicus Ground Motion Service". *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLIII-B3-2021, 141-146. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B3-2021-141-2021>.
- [10] Costantini, M., et al. (2021): "European Ground Motion Service (EGMS)". 2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS 2021, 3293-3296. <https://doi.org/10.1109/IGARSS47720.2021.9553562>.
- [11] Rosen, P., S. Hensley, I. Joughin, F. Li, S. Madsen, E. Rodriguez, and R. Goldstein (2000): "Synthetic aperture radar interferometry". *Proceedings of the IEEE*, 88, 3, 333-382.
- [12] Hanssen, R.F. (2001): "Radar Interferometry Data Interpretation and Error Analysis". Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 328 pp.
- [13] Crosetto, M., O. Monserrat, M. Cuevas-González, N. Devanthéry, and B. Crippa (2016): "Persistent Scatterer Interferometry: A review". *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115, May, 78-89.
- [14] Osmanoglu, B., F. Sunar, S. Wsowinski, and E. Cabral-Cano (2016): "Time series analysis of InSAR data: Methods and trends". *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115, May, 90-102.
- [15] Ho to Minh, D., R. Hanssen, and F. Rocca (2020): "Radar Interferometry: 20 years of development in time series techniques and future perspectives". *Remote Sensing*, 12, 1364, doi: 10.3390/rs12091364.
- [16] Xue, F., X. Lv, F. Dou, and T. Yun (2020): "A review of time-series interferometric SAR techniques. A tutorial for surface deformation analysis". *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, March 2020. doi: 0.1109/MGRS.2019.2956165.
- [17] Marchamalo-Sacristán, M., Fernández-Landa, A., Sancho, C., Hernández-Cabezudo, A., Krishnakumar, V., García-Lanchares, C., Sánchez, J., Martínez-Marín, R., Rejas-Ayuga, J.G., González-Tejada, I., Jordá, L., Ruiz-Armenteros, A.M., Lamas-Fernández, F. (2024): "EyeRADAR-Dam: Integration of MT-InSAR with monitoring technologies in a pilot monitoring system for embankment dams". *Procedia Computer Science*, 239, 2286-2292.

S.02

Sismologia e Física do Interior da Terra **Sismología y Física del Interior de la Tierra**

Breve estudio de las señales de largos periodos del terremoto de Lorca de 11 de Mayo de 2011

Brief study of the signals of long periods of the Lorca earthquake of May 11, 2011

BRAVO, José Benito ⁽¹⁾; SOSA, Maria Graciela ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Instituto Geográfico Nacional, Madrid, España

Autor correspondiente: jbbravo@transportes.gob.es

SUMMARY

In this article we have tried to study in some detail the long-period waves of the great earthquake that happened in the city of Lorca (Murcia) on May 11, 2011. In this work it is not intended to get general conclusions that could be applicable to other earthquakes, but more studies are necessary. The signals of the event between the frequencies 0.03 Hz and 0.06 Hz have been filtered, using the Hilbert transform we have calculated the envelope and studied the energy behaviour in that frequency range. First at all for the closest stations, up to approximately 100 km away from the epicentre; Second, for stations at different distances in order to see how these very low frequency waves develop versus distance and, finally, how this change azimuthally keeping the distance approximately constant. The goal of this article is to understand better the behaviour of the signals in this part of the spectrum for regional earthquakes. These signals are used for the calculation of the seismic moment tensor and moment magnitude (M_w), which are adjusted using synthetic seismograms in the Spanish National Seismic Network.

PALABRAS CLAVE

Largos periodos, envolvente (transformada de Hilbert), campo cercano, ondas Love (transversales), ondas Rayleigh (radial-vertical), movimiento de la partícula.

INTRODUCCIÓN

En este trabajo vamos a hacer una aproximación para estudiar la naturaleza de las ondas que se utilizan para calcular el tensor momento sísmico a partir del método de la generación de sismogramas sintéticos.

En el método se comparan los sismogramas reales con los sintéticos, mediante un ajuste mínimo cuadrático de ambas señales. Lo habitual es filtrar los sismogramas en frecuencias muy bajas (entre 0.03-0.08 Hz). El hecho de utilizar estas bajas frecuencias se debe a que (según la teoría de ondas más elemental), las ondas con longitudes de onda (λ), mucho mayores que las heterogeneidades de la corteza (L), no se ven afectadas por estas.

$$\lambda \gg L \quad (1)$$

Si suponemos rango de velocidades más o menos amplio de 6.0 km/s a 3 km/s, para frecuencias de entre 0.03Hz y 0.08 Hz, resultan longitudes de onda entre 200 km y 40 km aproximadamente. Tener en cuenta que cualquier heterogeneidad con dimensiones muchos más pequeña que estas longitudes de ondas (sea $\lambda/10$) no interfieren apreciablemente con nuestra señal.

En nuestros cálculos, como vemos no es necesario un conocimiento de la corteza terrestre muy detallado, que por otra parte seguramente no tenemos en muchos lugares.

En la generación de los sismogramas sintéticos y para que estos se parezcan a los sismogramas reales registrado en las estaciones sísmicas. Hemos de tener en cuenta que las señales que se generan en el foco sísmico, hasta que podemos visualizarlas, sufren ciertos efectos, el primero como ya hemos mencionado es el camino por donde se propagan las ondas, la corteza terrestre, otro y no menos importante es el equipo de captación (sensor) y procesado de la señal (digitalizador, DSP, etc.).

Si consideramos como $S(\omega)$, el espectro de frecuencia (donde $\omega=2\pi f$, f es la frecuencia), de nuestro sismograma registrado. En una aproximación lineal, $S(\omega)$, es el producto de los siguientes factores:

$$S(\omega) = T(\omega) \cdot H(\omega) \cdot F(\omega) \quad (1)$$

Donde $T(\omega)$; es el efecto de la corteza terrestre (con un espesor promedio de 30 km aproximadamente).

Tiene en cuenta como la señal original es modificada por el camino por el que se propaga. La interacción de las ondas sísmicas con el medio es compleja y difícil de modelar; si consideramos que la atenuación inelástica y de *scattering* que sufre la señal con la distancia pueden tenerse en calcularse por una exponencial:

$$e^{-r/Q(f)} \quad (2)$$

Donde $Q(f)$ es el factor de calidad, su inverso mide cuanta energía que se pierde en cada ciclo. Y depende de la frecuencia de forma exponencial.

$$Q(\omega) \propto f^n \quad (2)$$

Para frecuencias muy bajas (0.1 Hz) su efecto sobre la señal es prácticamente despreciable, como es nuestro caso. Frecuentemente se consideran sencillos modelo de capas planas, paralelas y homogéneas e isotrópicas, se producen fases reflejas y refractadas. Considerando ondas de muy largo periodo sólo las discontinuidades entre las capas son de interés. Las heterogeneidades (L) mucho menores que las longitudes de ondas (λ) pueden ser no tenidas en cuenta. Como ocurre en los sistemas de comunicaciones con las ondas electromagnéticas de RF.

Mencionamos ahora la atenuación geométrica que sufre la onda a medida que se propaga por propio ensanchamiento del frente de ondas. Se sabe que la energía de la señal decaerá con alguna potencia de la distancia al hipocentro (r^{-n}): con $n=2$ para ondas internas (P y S) y $n \approx 1$ para las ondas superficiales. Pero como esta atenuación afecta por igual a todas las frecuencias del registro en una estación, no supone ningún problema.

$H(\omega)$ es el efecto que producen los equipos de registro (sismógrafo).

Se puede conocer, modelando la función de transferencia a partir de las constantes que nos suministra los fabricantes de los equipos. Vamos a considerar un rango de frecuencias entre 0,03Hz y 0,06 Hz, donde la respuesta del sensor no distorsione apreciablemente la señal, salvo que quede multiplicada por un factor constante. Los sismómetros utilizados son Guralp CMG-3T pertenecientes a la Red Sísmica Nacional (RSN). Ver figura 1.

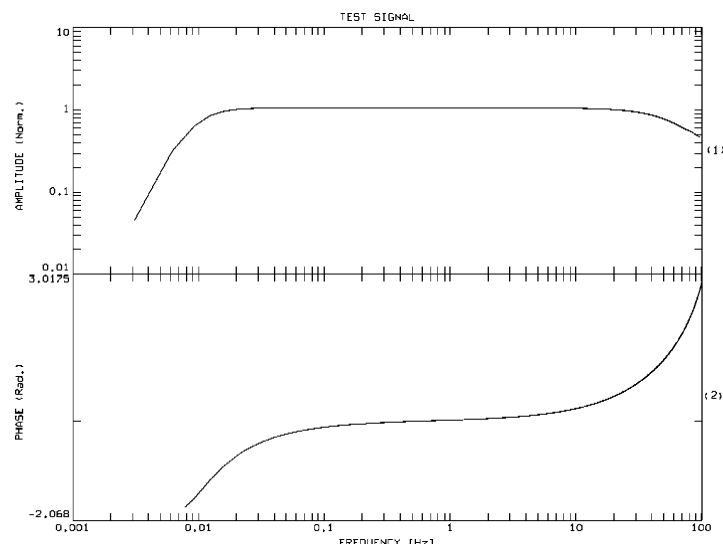


Figura 1: Curva de respuesta estándar en amplitud (1) y fase (2) frente a la frecuencia de los sensores utilizados en este artículo.

$F(\omega)$; es la representación de la fuente sísmica en el dominio de las frecuencias. Se puede modelar: por una función temporal, una representación geométrica de como es la fuente (Tensor Momento Sísmico) y el tamaño (Momento Sísmico Escalar). Si consideramos terremotos de origen tectónico, debido a una falla geológica y modelizamos la falla como una fractura en el terreno, donde se produce un desplazamiento más o menos repentino de los dos bloques a ambos lados de la falla; debido a un

doble par de fuerzas sin Momento neto resultante. Obtenemos las siguientes ecuaciones para los desplazamientos radial, transversal y vertical, en el dominio de la frecuencia, separando los factores que dependen de la orientación de la falla, y las llamadas “funciones de Green”. La Transformada de Fourier de los Desplazamientos particularizados para la superficie libre ($z = 0$), a una distancia “ r ” de la fuente, viene dada en función de las llamadas funciones de Green en coordenadas cilíndricas [1]:

$$u_z(r, 0, \omega) = ZSS [(f_1 n_1 - f_2 n_2) \cos 2\phi + (f_1 n_2 + f_2 n_1) \sin 2\phi] + ZDS [(f_1 n_3 + f_3 n_1) \cos \phi + (f_2 n_3 + f_3 n_2) \sin \phi] + ZDD (f_3 n_3) \quad (3.a)$$

$$u_r(r, 0, \omega) = RSS [(f_1 n_1 - f_2 n_2) \cos 2\phi + (f_1 n_2 + f_2 n_1) \sin 2\phi] + RDS (f_1 n_3 + f_3 n_1) \cos \phi + (f_2 n_3 + f_3 n_2) \sin \phi + RDD (f_3 n_3) \quad (3.b)$$

$$u_\phi(r, 0, \omega) = TSS [(f_1 n_1 - f_2 n_2) \sin 2\phi - (f_1 n_2 + f_2 n_1) \cos 2\phi] + TDS [(f_1 n_3 + f_3 n_1) \sin \phi - (f_2 n_3 + f_3 n_2) \cos \phi] \quad (3.c)$$

Donde: “ r ” es la distancia epicentral, y “ z ” está medida respecto a la profundidad de la fuente. Y n_1, n_2 , y n_3 son las componentes del vector $\mathbf{n}$, f_1, f_2 , y f_3 son las componentes del vector $\mathbf{f}$. $\mathbf{n}$ y $\mathbf{f}$ son los vectores normales al plano de falla y en la dirección de la dislocación (*slip*) respectivamente. De la orientación de la falla respecto al norte y del desplazamiento de un bloque respecto a otro; dependerán las direcciones de los vectores $\mathbf{f}$ y $\mathbf{n}$.

Las funciones ZDD, RDD, ZDS, RDS, TDS, ZSS, RSS y TSS, son las Funciones de Green, antes mencionadas, en las componentes vertical (Z), radial (R) y transversal (T) que, para el caso concreto de un Doble Par de Fuerzas, dependen de r , z (incluida la profundidad de la fuente, h), y la frecuencia (ω). Son funciones dependientes del Modelo de Corteza elegido, es decir, del número de capas, de las constantes elásticas, etc. Sin embargo, son independientes del Mecanismo de la Fuente y de la Función Temporal de la Fuente. Observar como en el dominio de las frecuencias, los Desplazamientos se obtienen como una combinación lineal de las Funciones de Green, esto es muy importante para los Métodos que utilizan Inversión de Ondas. Y que también finalmente, los desplazamientos se obtienen de la convolución de las expresiones de arriba (ec. 3.a, 3.b y 3.c), con la función temporal de la fuente.

El cálculo de las componentes de estos vectores (n_1, n_2, n_3) y (f_1, f_2, f_3), son las incógnitas del problema de Inversión de Ondas a partir de sismogramas sintéticos.

Como hemos dicho considerar señales de largo periodo, permite calcular Funciones de Green para modelos de corteza más sencillos.

LARGOS PERIODO DEL TERREMOTO DE LORCA DE 12 DE MAYO DE 2011

En este apartado vamos a estudiar las señales de muy baja frecuencia (entre 0,03 Hz y 0,06 Hz), para uno de los terremotos más importantes ocurridos en España en los últimos años, como es el terremoto acaecido en la ciudad de Lorca (Murcia) el 11 de mayo de 2011 de Mw 5,1 a las 16:47:25 (UTC) con coordenadas: 11-mayo-2011 16:47:25 37.7267 (latitud) -1.6862 (longitud) y 5,0 km. Este terremoto fue registrado por muchísimas estaciones en todo el mundo.

En la Figura 2. Podemos ver el mecanismo de este terremoto del catálogo de terremotos del Instituto Geográfico Nacional (IGN) [2].



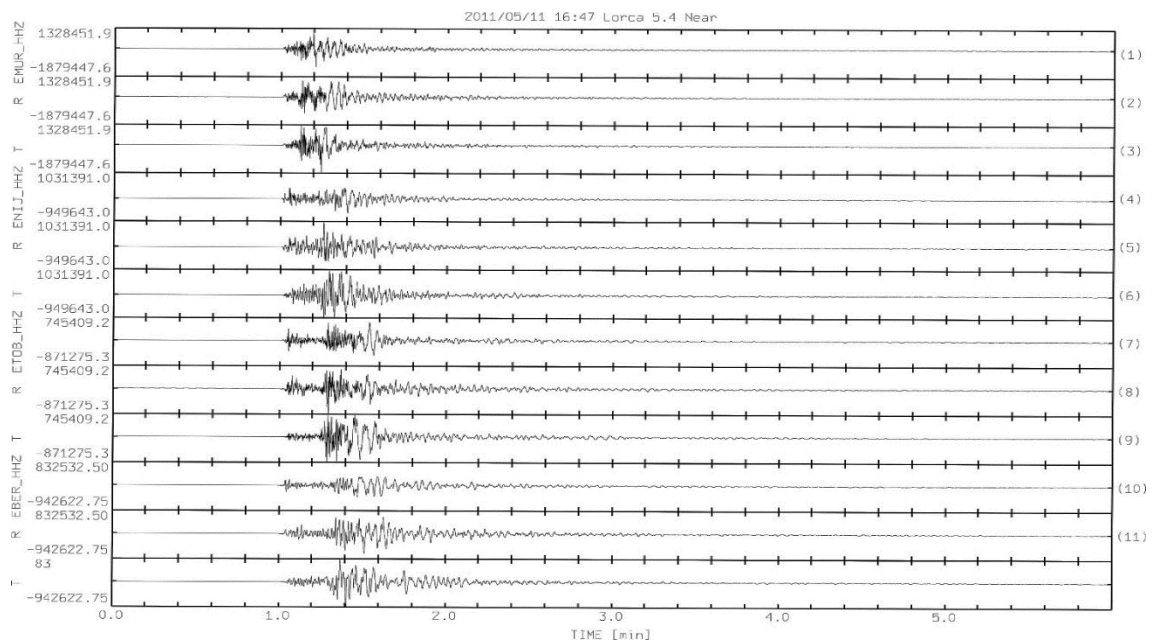


Figura 4: Señales de Banda Ancha de las estaciones EMUR, ENIJ, ETOB y EBER. Componentes Z, R y T.

En la Figura 4. Podemos ver las señales de Banda Ancha (BB), sin ningún tipo de corrección, ni conversión (las unidades son cuentas) y sin ningún tipo de filtrado. Z: Componente Vertical, R: Componente Radial y T: componente Transversal

Debemos mencionar que para el cálculo de las componentes Radial y Transversal a partir de las componentes originarias

Este y Norte, hemos tenido en cuenta el error de orientación que respecto al Norte algunas estaciones de la RSN sufrían por esa época (*misorientation*) [3]. Por ejemplo EMUR se corrigió por un error de $-25,9^\circ$, EBER por un error de $10,4^\circ$, etc.

En la Figura 5. se muestran las señales filtradas (BP) con un Filtro Butterworth Paso Banda de 0,03Hz a 0,06Hz, No causal, de 2 polos en total.

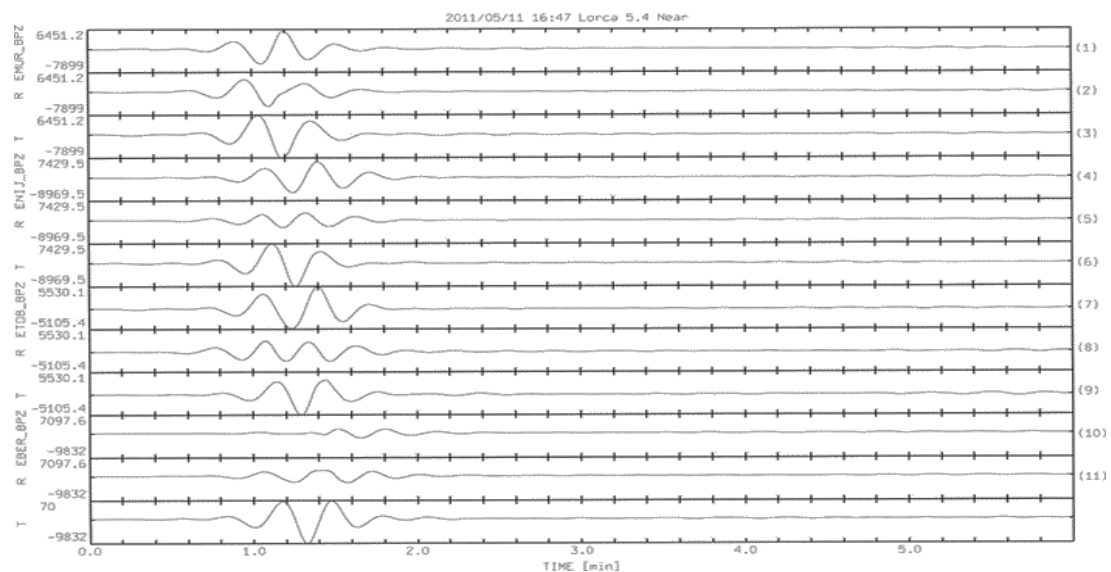


Figura 5: Señales de Filtradas (0,03-0,06 Hz) de las estaciones EMUR, ENIJ, ETOB y EBER. Componentes Z, R y T. Ver texto.

En la Figura 6. Se puede observar con detalle la envolvente de la señal para la estación de ejemplo ETOB, el calculo de la

envolvente lo hemos realizado a través de la Transformada de Hilbert. Con esto pretendemos suavizar un poco más la señal para poder realizar una mejor comparación entre estaciones, además se sabido que la envolvente tiene una relación más directa con la propia energía de la señal.

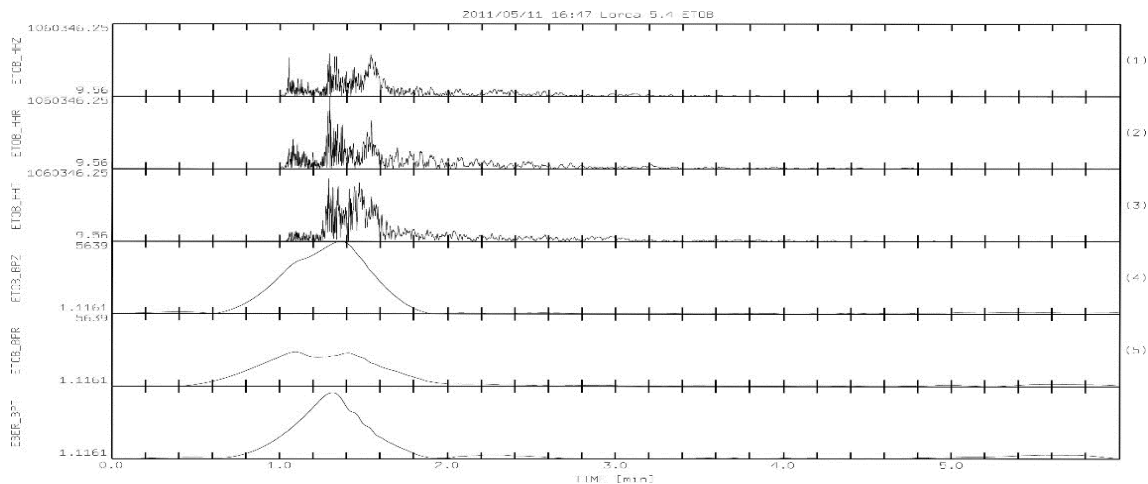


Figura 6: Las tres primeras señales son las envolventes para las componentes Z, R y T para la estación ETOB y para las señal de Banda Anchas (BB), mediante la Transformada de Hilbert. Las tres ultimas señales son las envolventes para la componetes filtradas (BP) de 0,03H a 0,06Hz (ver texto), para la misma estación.

En la Figura 7. Hemos presentado la envolvente de las señales de Banda Ancha (BB) de las estaciones que estamos estudiando. Como era de esperar no ningún detalle que podemos destacar.

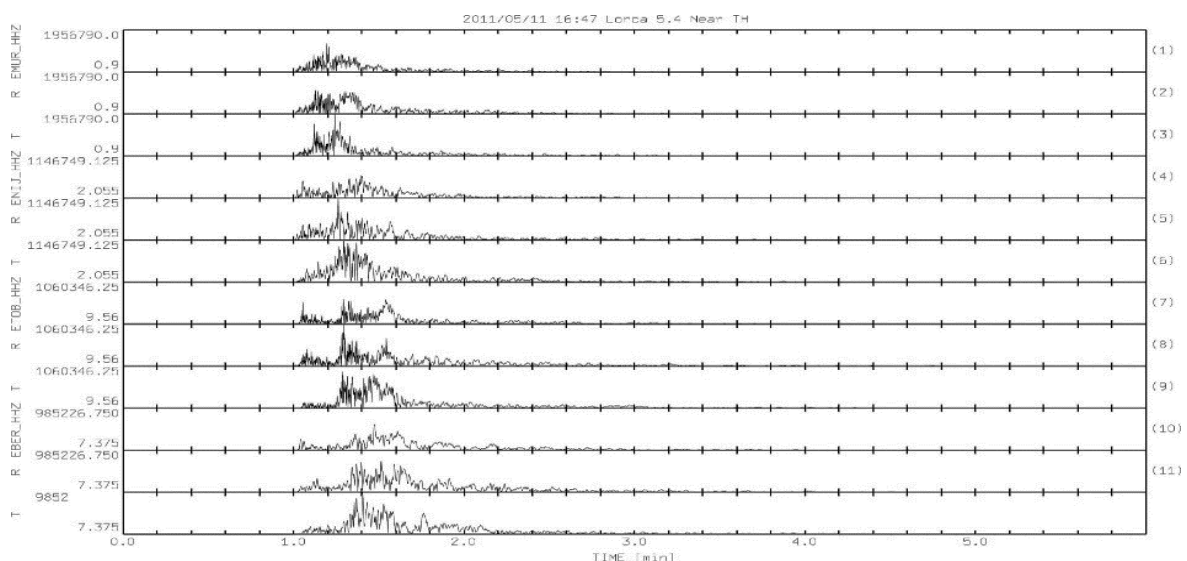


Figura 7: Envolvente de las señales de Banda Ancha (BB) de las estaciones seleccionadas más cercanas: EMUR, ENIJ, ETOB y EBER.

Sin embargo, en las envolventes de las componentes filtradas con el filtro paso banda mencionada (BP), en la Figura 8. podemos observar que hay una cierta variabilidad entre las componentes Vertical (Z), Radial (R) y Transversal (T), sin las comparamos entre si y de estación en estación. Esta variabilidad, que también podemos ver en las componentes filtradas (Ver Figura 5. BP), es la que nos permite calcular los ángulos del plano de falla y la dirección del deslizamiento (*slip*) que comentamos en las ecuaciones 3.a., 3.b. y 3.c. mediante el ajuste por mínimos cuadrados entre la señal real y la señal sintética en el método de inversión.

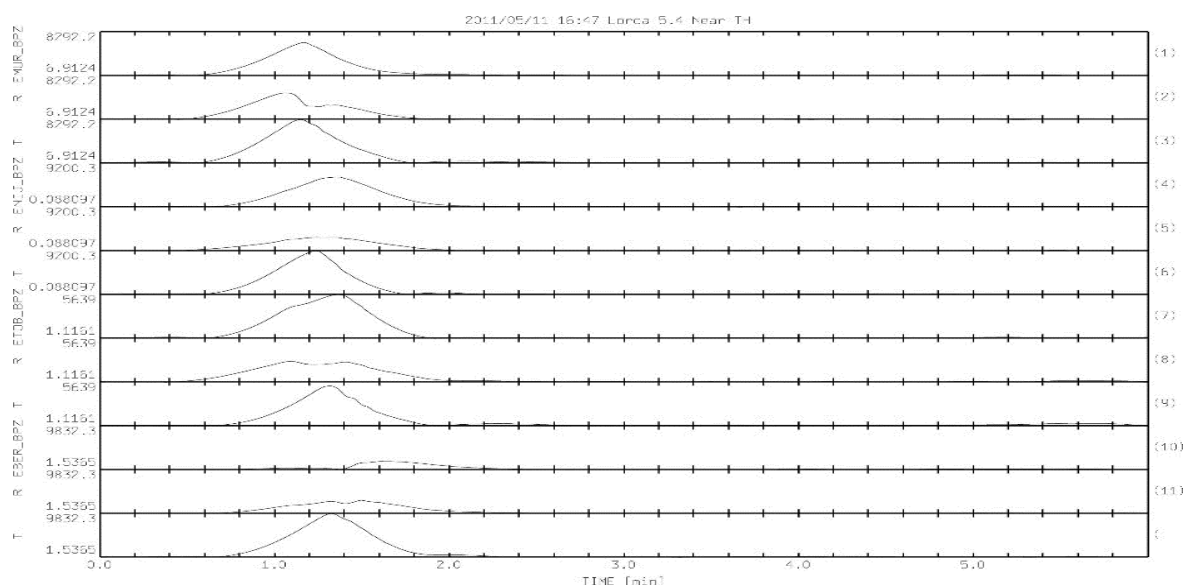


Figura 8: Envolvente de las señales filtradas (BP) de las estaciones seleccionadas más cercanas: EMUR, ENIJ, ETOB y EBER.

ESTACIONES VERSUS DISTANCIA

Ahora vamos a considerar estaciones que registraron el terremoto algo más lejanas; dada una dirección (un azimut más o menos fija) como se comportan las señales de las componentes Z, R y T a medida que aumenta la distancia.

En la Figura 9. vemos un mapa con las estaciones seleccionadas: EQES, Quesada (Jaén); EADA, Adamuz (Córdoba); ECAB, El Cabril (Córdoba); EMIN, Mina Concepción (Huelva); EBAD, Badajoz (Badajoz) y EGRO, El Granado (Huelva).



Figura 9: Con una cruz azul hemos señalado el epicentro del terremoto y recuadradas en rojo la estaciones elegidas de la RSN elegidas, para el estudio de este apartado.

A modo de ejemplo la distancia entre el epicentro y la estación de EMIN hay unos 450 km.

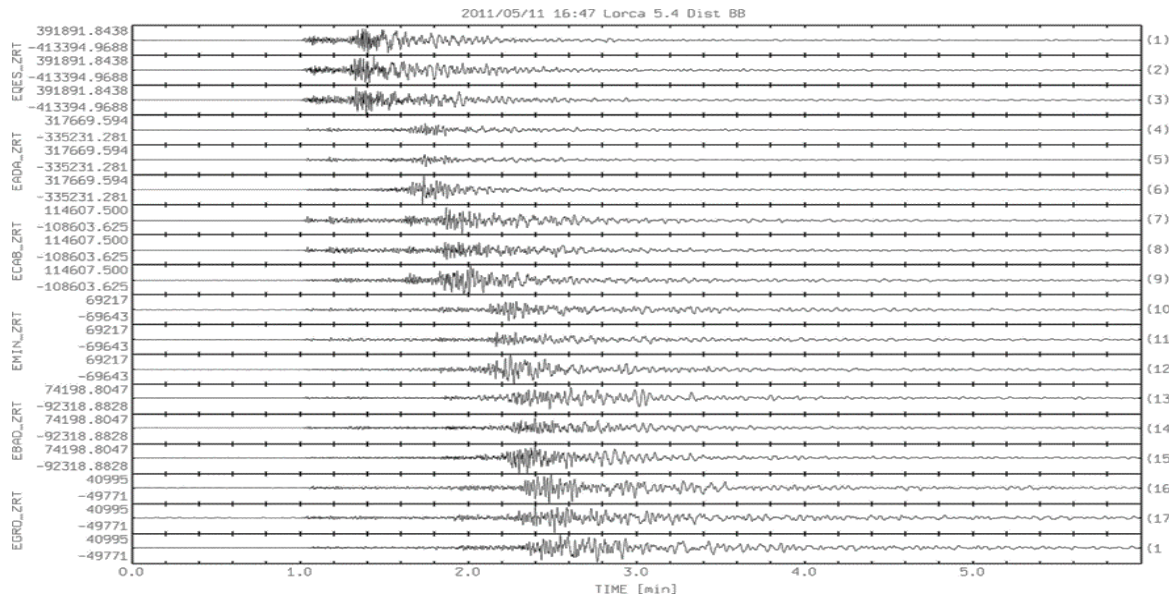


Figura 10: Sinais de Banda Ancha de las estaciones EQES, EADA, ECAB, EMIN, EBAD y EGRO. Componentes Z, R y T.

En la Figura 10. Podemos ver las señales de banda ancha sin filtrar, en la Figura 11. Las mismas señales, pero filtradas (con el filtro Butterworth pasa banda antes mencionado) y en la Figura 12. a) y b). Las envolventes de las señales filtradas aplicando la transformada de Hilbert.

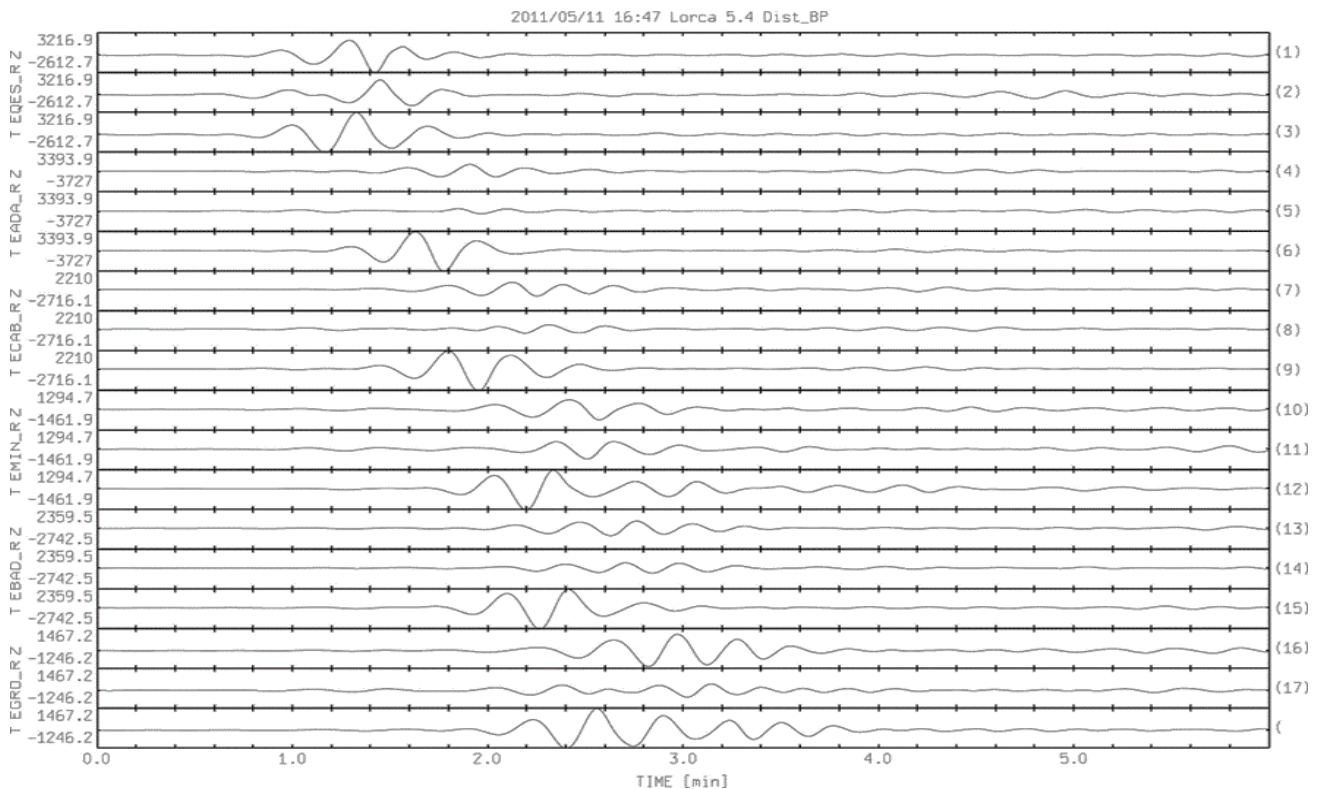


Figura 11: Sinais filtradas (Filtro Butterworth Pasa-Banda 0,03Hz-0,06Hz, no causal 1 polo) de las estaciones EQES, EADA, ECAB, EMIN, EBAD y EGRO. Componentes Z, R y T.

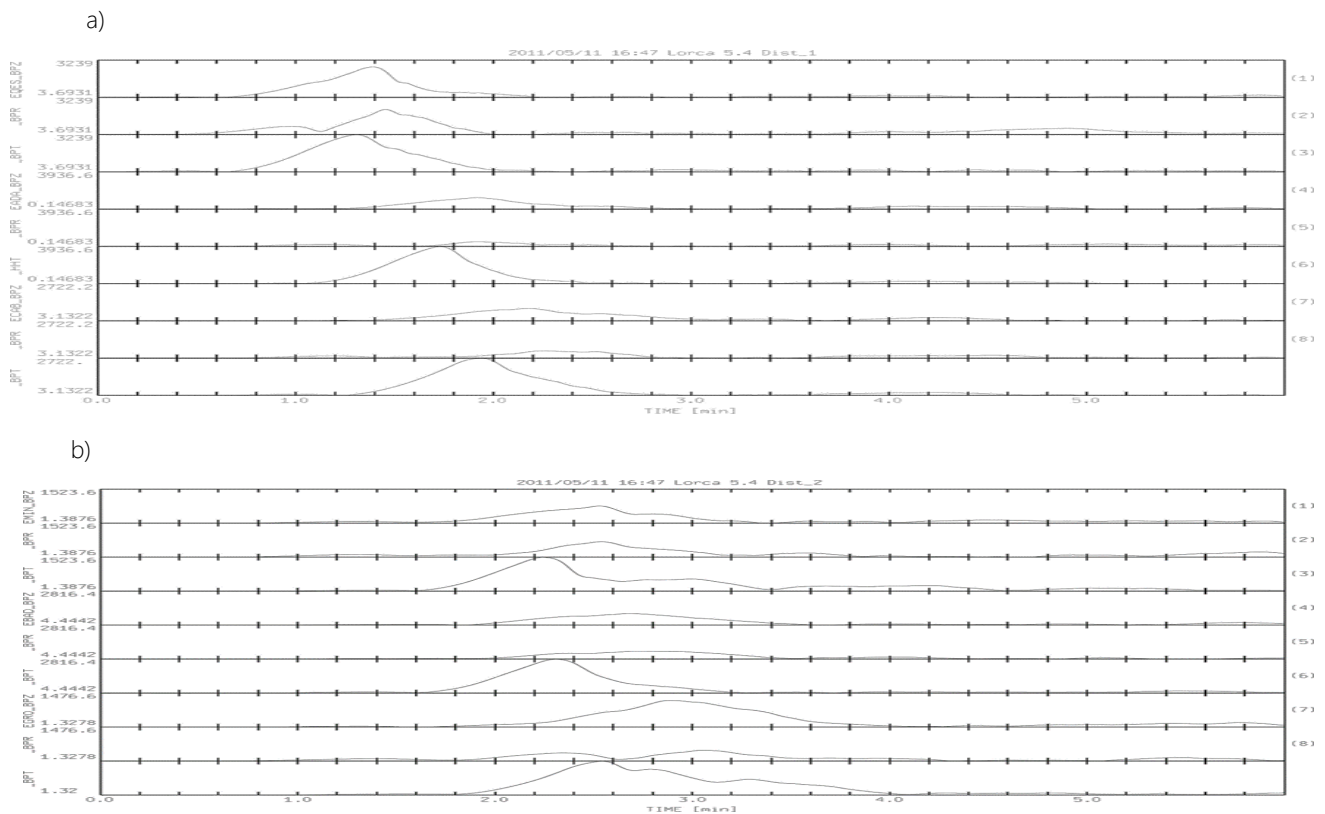


Figura 12: Envolvente de las señales filtradas (BP) de las estaciones seleccionadas: a). EQES, EADA y ECAB. b). EMIN, EBAD y EGRO Componentes Z, R y T.

Observamos nuevamente como para cada estación individualmente la relación de las componentes Radial-Vertical y Transversal es muy parecida de estación a estación e incluso entre estaciones; si tenemos en cuenta el decaimiento de amplitud debido a la expansión geométrica (*geometrical spreading*). También podemos observar algo interesante: como la componente transversal se adelanta en el tiempo a la componente Radial-Vertical.

ESTACIONES VERSUS AZIMUT

Volvemos a considerar una serie de estaciones que estuviesen a una distancia aproximadamente parecida del epicentro pero barriendo un ángulo azimutal más o menos grande. En la Figura 13. Se muestra un mapa con las estaciones que se han elegido: EALB, Isla de Alborán (Almería); ECEU, Ceuta; ESPR, Espera (Cádiz); EMIN, Mina Concepción (Huelva); EPLA, Plasencia (Cáceres); GUD, Guadarrama (Madrid); ESAC, San Caprasio (Zaragoza) y ERTA, Horta de Sant Joan (Tarragona).

En la Figura 14. Podemos ver las señales de banda ancha originales, en la Figura 15. Las mismas señales pero filtradas y en la Figura 16. a) y b). Las envolventes de las señales filtradas.



ESTACIONES DE LA RED SÍSMICA NACIONAL



Figura 13: Con una cruz azul hemos señalado el epicentro del terremoto y recuadradas en rojo la estaciones elegidas de la RSN elegidas, para el estudio de este caso.

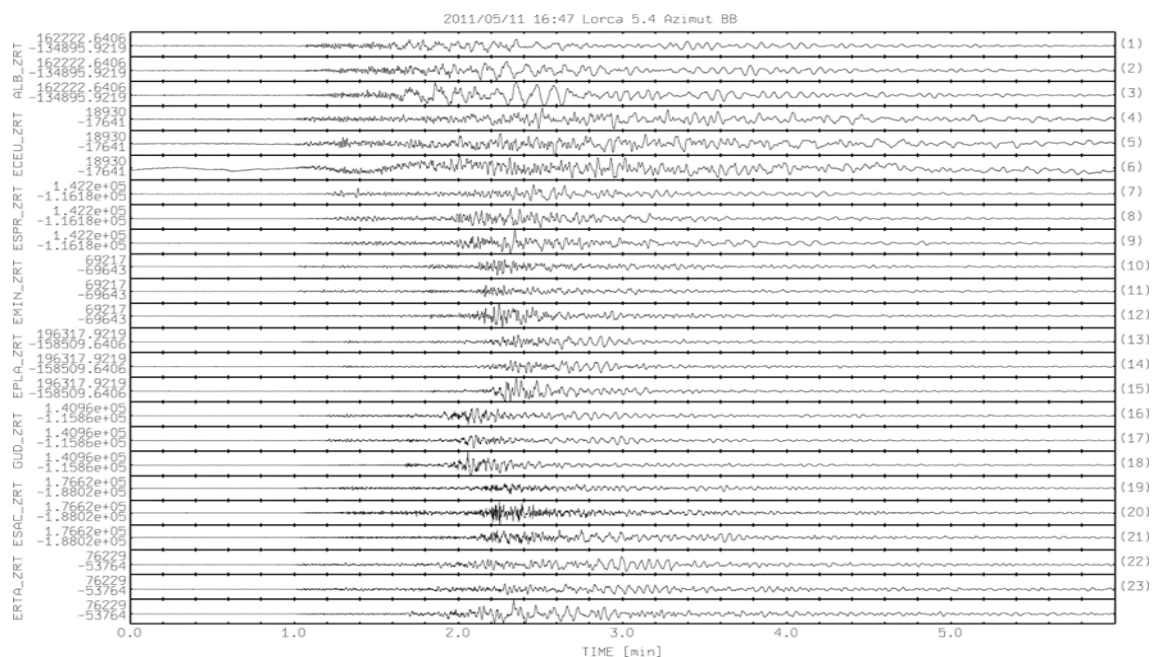


Figura 14: Señales de Banda Ancha de las estaciones EALB, ECEU, ESPR, EMIN, EPLA, GUD, ESAC y ERTA. Componentes Z, R y T.

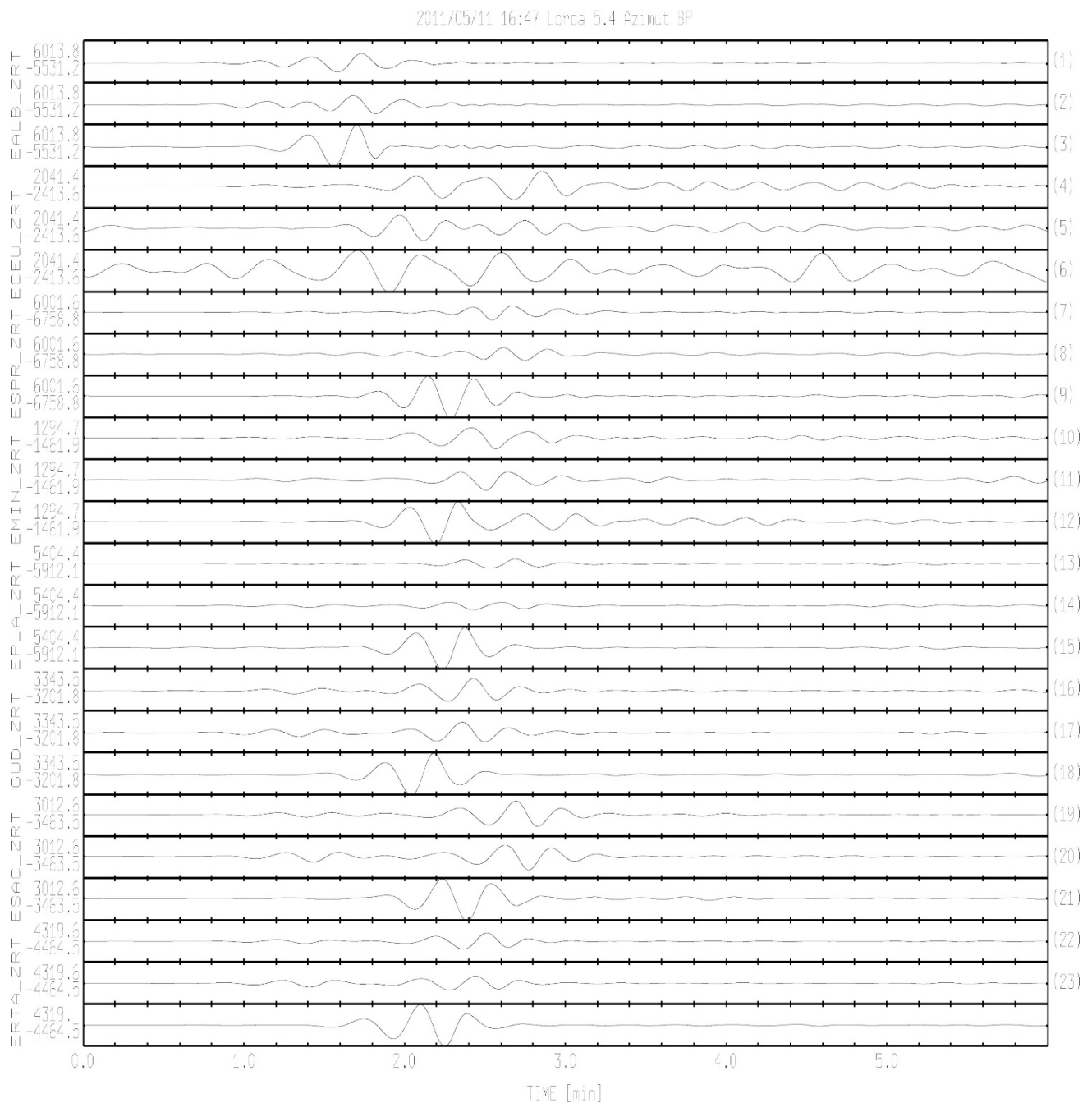


Figura 15: Señales filtradas (Filtro Butterworth Pasa-Banda 0,03Hz-0,06Hz, no causal 1 polo) de las estaciones EALB, ECEU, ESPR, EMIN, EPLA, GUD, ESAC y ERTA. Componentes Z, R y T.

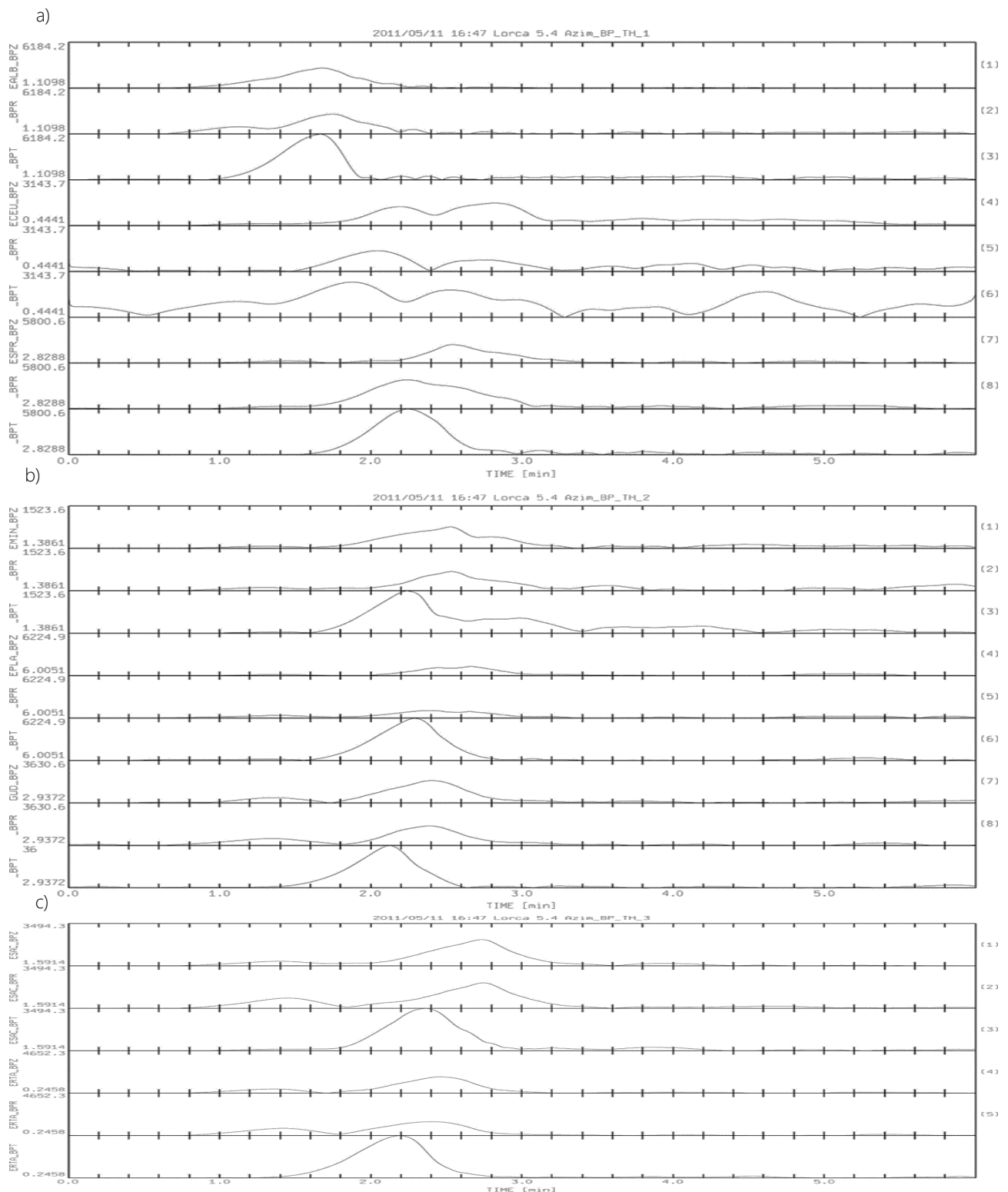


Figura 16: Envolvente de las señales filtradas (BP) de las estaciones seleccionadas: a). EALB, ECEU y ESPR, b) EMIN, EPLA y GUD, c). ESAC y ERTA Componentes Z, R y T.

Observamos nuevamente como para cada estación la relación Radial-Vertical y Transversal es muy parecido en todas las estaciones y como en el caso anterior, estaciones a diferentes distancia y parecido azimut desde el epicentro, la componente Transversal parece adelantarse a la componente Radial-Vertical.

DISCUSION

De lo expuesto anteriormente y de lo ya comentado, podemos extraer que las estaciones más cercanas al epicentro del terremoto presentan una variabilidad con el azimut de las componentes Radial-Transversal y Vertical, lo que permite reflejar bien la geometría de la fuente sísmica para una falla geológica y por ende el tensor momento sísmico.

Hemos visto como aunque variemos la distancia al epicentro y el azimut de la estación con respecto al epicentro la variabilidad de las componentes no es muy grande.

En la Figura 17. Presentamos el movimiento de la partícula de la estación de ECAB, el Cabril (Cordoba).

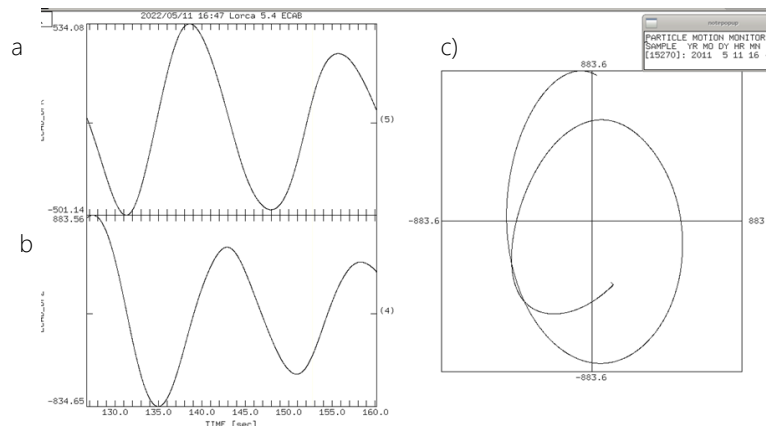


Figura 17: Estación ECAB. a). Componente Vertical (Z) de la señal filtrada. b). Componente Radial (R) de la señal filtrada. c) Composición del movimiento de la partícula de las componentes Z-R.

En la Figura 17. Hemos representado el movimiento de la partícula de las componentes Vertical-Radial a modo de ejemplo; podemos ver el movimiento elíptico de la partícula. Considerando además el hecho de que la velocidad de las componentes Radial-Vertical es menor que la componente Transversal. Pesamos que estamos considerando ondas de tipo superficial; ondas Rayleigh para las componentes Radial-Vertical y ondas Love para la componente Transversal.

CONCLUSIÓN

De los resultados de este trabajo que no tratan de ser generalistas, creemos que las estaciones al epicentro (distancias inferiores a 100 km), son muy importantes a la hora de calcular la orientación y el deslizamiento (*slip*) de la falla, cuando calculamos el tensor momento sísmico utilizando muy bajas frecuencias (0,03Hz-0,06Hz), por el método de inversión de ondas.

Sin embargo, para estaciones más lejanas (> 100 km) las ondas Rayleigh y ondas Love empiezan a desarrollarse por la composición de muchos rayos con ángulos de incidencia supercríticos atrapados en la corteza terrestre: ondas canalizadas.

REFERENCIAS

- [1] Herrmann, R. B. (1993). "Elastic Wave Green's Functions for Isotropic Layered Media". Manual of Computer Programs in Seismology. Saint Luis University. U. S. A.
- [2] IGN: <https://www.ign.es/web/ign/portal/tensor-momento-sismico/-/tensor-momento-sismico/getBbdd?zona=1&anio=2011#>
- [3] Rueda, J., and J. Mezcua (2015). "Orientation Analysis of the Spanish Broadband National Network Using Rayleigh-Wave Polarization, Seismol. Res. Lett. **V. 86** (N.3), 1-12, doi: 10.1785/0220140149

Una historia tentativa y patrimonio preservado de una estación sísmica casi olvidada en Girona (NE Península Ibérica)

A tentative history and preserved patrimony of an almost forgotten seismic station at Girona (NE Iberian Peninsula)

BATLLÓ, Josep ⁽¹⁾; MERINO, Maria Teresa ⁽²⁾

⁽¹⁾ Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC), Barcelona, España

⁽²⁾ Observatori Fabra (RACAB), Barcelona, España

Autor correspondiente: josep.batllo@icgc.cat

SUMMARY

Seismology developed as a quantitative observational science at the turn of the XX Century. Development of seismographs resulted in the establishment of a few hundreds of seismological observatories in Europe. Ten of them in the Iberian Peninsula (ALI, ALM, COI, CRT, EBR, FBR, LIS, MAL, SFS and TOL) are well known and survived up to present days. Instrumental record of earthquakes in the Peninsula relayed on them up to the celebration of the International Geophysical Year (1957) when new initiatives were developed.

But there were also other initiatives less successful. We devote this presentation to our studies on one of them: the Girona Seismological Station (NE Iberian Peninsula). It was created in 1909, and it was active up to, at least, 1919. It was installed at and belonged to the Girona Instituto General y Técnico and was operated under the supervision of the Natural Sciences Professors. It received permanent advice from the Fabra Observatory (FBR) seismic station directors in Barcelona.

It is not easy to reconstruct its operational history as preserved documents and records are scarce. We know that two different instruments, a Vicentini Seismoscope and a Mainka pendulum, were installed successively at this station. These instruments did not survive and, at present, just a reproduction of one record obtained with the Vicentini seismoscope is preserved. However, we have found almost two hundred records from the Girona seismic station (including 147 Mainka pendulum original seismograms) among the documents and records preserved at Fabra Observatory (FBR) archive.

Study of the preserved records, some scarce correspondence, manuscript annotations found in other archives, and some published notes about the station, led us to get a general idea about how this small local station was operated and the scientific value of its preserved records. We are presenting these results here.

PALABRAS CLAVE

Estación sísmica, Girona, Sismometría, Instrumentos antiguos, Sismogramas analógicos.

INTRODUCCIÓN

La sismología no se desarrolló como una ciencia observacional cuantitativa hasta principios del siglo XX. Sus primeros desarrollos dieron lugar al establecimiento de unos pocos cientos de observatorios sismológicos en Europa. Diez de ellos en la Península Ibérica (ALI, ALM, COI, CRT, EBR, FBR, LIS, MAL, SFS y TOL) son bien conocidos y sobrevivieron hasta nuestros días. El registro instrumental de los terremotos en la Península se basó en ellos hasta la celebración del Año Geofísico Internacional (1957), cuando se desarrollaron nuevas iniciativas.

Pero también hubo otras iniciativas menos exitosas. Dedicamos esta presentación a nuestros estudios sobre una de ellas: la Estación Sismológica de Girona (NE Península Ibérica). Esta fue creada en 1909 y estuvo activa, al menos, hasta 1919. Estaba instalada y pertenecía al Instituto General y Técnico de Girona y funcionaba bajo la supervisión de los Catedráticos de Ciencias Naturales del centro. En sus años de su existencia contó con el asesoramiento permanente de los sucesivos directores de la estación sísmica del Observatorio Fabra (FBR) de Barcelona, Josep Comas y Solà y Eduard Fontserè.

Ya habíamos detectado la existencia de esta estación hace tiempo y le dedicamos algunos estudios (Batlló, 1998, 2003, 2004). Sin embargo, no es fácil reconstruir su historia operativa ya que los documentos y registros conservados son escasos. Sabemos que en ella se instalaron sucesivamente dos instrumentos diferentes: un sismoscopio Vicentini y un péndulo horizontal de Mainka. Ninguno de estos instrumentos se ha conservado y, en la actualidad, sólo conocemos una reproducción de un registro obtenido

con el sismoscopio Vicentini. Recientemente hemos encontrado casi doscientos registros de la estación sísmica de Girona (incluidos 147 sismogramas originales del péndulo de Mainka) y otras informaciones y correspondencia entre los documentos y registros conservados en el archivo del Observatorio Fabra (FBR), de la Reial Acadèmia de Ciències i Arts de Barcelona. Este descubrimiento nos permite profundizar un poco más en el conocimiento de esta estación.

A partir del estudio de los registros conservados, la escasa correspondencia disponible, anotaciones manuscritas encontradas en otros archivos y algunas notas publicadas sobre la estación, podemos formarnos una idea general sobre cómo funcionaba esta pequeña estación local y el valor científico de los registros conservados. Presentamos aquí estos resultados.

LAS FUENTES DOCUMENTALES

Las primeras referencias impresas sobre la existencia de una estación sísmica en Girona las encontramos, en las *Memorias de la Real Academia de Ciencias y Artes de Barcelona* (citadas a partir de ahora como mRACAB). También es importante la prensa escrita local, muy en concreto el *Diari de Girona* (DdG). Asimismo, las *Memorias del Instituto General y Técnico de Gerona* (mIGyTG) nos dan información de primera mano sobre el tema. La información manuscrita procede, principalmente, de los documentos conservados en el *Fons Institut* (Flns) que se encuentra el Archivo Histórico de Girona y del *Diario de Observaciones* (DdOb) de la estación sísmica del Observatorio Fabra. Es posible extraer algunas informaciones más técnicas directamente del estudio de los registros encontrados, localizados todos en el mismo Observatorio Fabra. También se han encontrado otras informaciones dispersas que mencionaremos en el momento oportuno.

BREVE HISTORIA

Para comenzar, diremos que la estación sísmica de Girona estuvo siempre ligada al llamado Instituto General y Técnico (actual IES Jaume Vicens Vives). No sabemos exactamente las causas directas que llevaron a la adquisición de su primer aparato para el registro sísmico. Podemos formular, no obstante, algunas suposiciones fundamentadas. Por una parte, ya hemos mencionado el interés general que había en la época por el estudio de la Tierra. A un nivel más local coincide en el tiempo con muchos de los primeros trabajos modernos de geología en Cataluña, y a que, ya en ese momento, se había llegado, cualitativamente, a evaluar la zona de los Pirineos como la más propensa a la ocurrencia de terremotos en la región. Indirectamente, está bastante claro que la presencia en el Instituto de Girona, como catedrático numerario de historia natural y secretario del centro, del Dr. Manuel Cazorro Ruiz (véase Pascual (1976) para más información), que en los años 1906-07 participó muy activamente en la instalación de un sismoscopio en Olot (historia también interesante, que dejaremos para otra ocasión y de la que se puede encontrar unas pequeñas referencias en Mallarach (1985) y Batlló (2004)), debió de ser determinante en este hecho.

El caso es que, en la memoria del Instituto del curso 1908-09 (mIGyTG, 1908-09, p.12-13) se consigna la adquisición de un Sismoscopio Vicentini con cargo a la "consignación extraordinaria para fomento del Material de Gabinetes y Laboratorios". Esta asignación se concedía anualmente por parte del Estado y a modo de presupuesto extraordinario para la adquisición de material científico por los diferentes institutos y, por lo que vemos, ese año el instituto decidió solicitar, entre otros materiales, un sismógrafo. Efectivamente, en enero de 1909 el nuevo aparato estaba ya en el instituto de Girona, como lo confirma una noticia del *Diari de Girona* (DdG, 12 de enero) también reproducida en *La Vanguardia de Barcelona* (14 de enero): «Ha sido adquirido para el Instituto y se está actualmente montando bajo la dirección del ilustrado profesor de ese centro don Manuel Cazorro un sismógrafo que funcionará en combinación con el que hay instalado en Olot».

No conocemos la fecha exacta de su puesta en funcionamiento; pero este instrumento ya registró el terremoto de Olot del 6 de abril de 1909 (Comas y Solà, 1909). El propio Comas y Solà y otras fuentes nos confirman que el Dr. Cazorro era el responsable del funcionamiento del aparato, que estaba instalado en las mismas dependencias del Instituto General y Técnico, entonces en el antiguo convento de los capuchinos en la calle de la Força, y muy cerca de la Catedral. En concreto, se encontraba en su laboratorio (gabinete) de Historia Natural, que se corresponde aproximadamente con la actual sala de lectura del archivo de la ciudad, que actualmente ocupa una parte del edificio. Este sismoscopio debería funcionar regularmente hasta el año 1912 o 1913, ya que encontramos referencias a sus registros en las memorias de la Real Academia de Ciencias y Artes de Barcelona. Puntualizaremos aquí que no se trataba, hablando con propiedad, de un sismógrafo, sino de lo que técnicamente llamamos un sismoscopio, siendo la principal diferencia entre un sismoscopio y un sismógrafo que el registro del primero no ofrece ninguna referencia temporal, absoluta o relativa. Dejaremos la descripción detallada del aparato y de sus registros para los siguientes apartados. Anecdóticamente, diremos que conocemos el coste del aparato, que fue de 88 pesetas y 25 céntimos, y que se pagaron 25 pesetas por los portes asociados, como consta en el libro de caja del instituto (Libro de Mayor, p. 47- 48, Flns, sig. 1535) con fecha de enero de 1909.

Seguramente, debido a las carencias que ofrecía un aparato tipo sismoscopio respecto a un verdadero sismógrafo, se debió decidir actualizar el aparato registrador y, al mismo tiempo, hacer una mejor instalación. Así pues, en la memoria del instituto del curso 1913-14 encontramos lo siguiente: «En la planta baja del edificio se ha instalado el hermoso Sismógrafo registrador, modelo bifilar del Dr. Mainka, con cronógrafo y accesorias, construido por la casa Bosch de Estrasburgo y adquirido con cargo al crédito extraordinario concedido por R.O. de 26 de octubre de 1912, previa propuesta aprobada por el Instituto de Material Científico. Al efecto, se ha habilitado un local, arreglando la puerta y poniendo un macizo de hormigón para procurar en el aparato las mejores condiciones de sensibilidad y aislamiento de extrañas influencias».

Esta instalación (sobre la puerta había un gran letrero de madera con la palabra Sismógrafo) se encontraba entrando al instituto por la puerta principal a la derecha, al fondo de donde se encuentra la actual puerta de entrada y subida al archivo (véase la figura 1) y hace unos años su existencia aún era recordada por alumnos que estudiaron antes de la Guerra Civil (ver, p.e., Estrach, 1995; o Julià, 1995).



Figura 1: Fotografía histórica de la puerta del antiguo Instituto General y Técnico de Girona. El sismógrafo Mainka se encontraba a la derecha de esta entrada, en una pequeña sala detrás de la ventana que se observa (de Lajo, 1995).

Suponemos que el nuevo aparato no entró de inmediato en funcionamiento. El motivo es que el 31 de julio de 1913 cesó el Dr. Cazorro, que suponemos se ocupó de su adquisición, por traslado al instituto de Barcelona. Aparte de una carta enviada por J. Estalella a principios de setiembre del mismo año (la comentaremos y reproducimos un fragmento más adelante, figura 3), a partir de ese momento perdemos cualquier referencia de ambos aparatos, tanto del antiguo como del nuevo, aunque en un artículo publicado por Comas y Solà en La Vanguardia, en fecha 17 de marzo de 1915, se dice que hay «un péndulo horizontal instalado en el Instituto de Gerona», y no es hasta el año 1916 en que encontramos al Dr. Joaquín Novella Valero, también catedrático de historia natural del centro (ocupó la cátedra dejada vacante por Cazorro en 1914) como responsable del funcionamiento del nuevo sismógrafo. Eduard Fontserè, entonces director del Observatorio Fabra, puso «en estado de funcionamiento» (Fontserè, 1921) el aparato en otoño de 1916. Una carta manuscrita del mismo Novella al director del Observatorio

del Ebro, R. Cirera, con fecha de 1 de diciembre de 1916 lo confirma: «Aquí tenemos un sismógrafo Mainka y después de muchas y largas dificultades he podido hacer que principie a funcionar». La misma carta nos aporta un dato muy interesante: «...ni para el sismógrafo, independiente del Instituto, tengo consignación de que me permita sufragar los gastos de todo lo que me hace falta. Así que no sé lo que voy a poder hacer».

Por tanto, el funcionamiento del sismógrafo, aunque adquirido con fondos destinados a mejorar el instrumental de los institutos, era independiente del funcionamiento del mismo centro, es decir, no se preveía su mantenimiento dentro de las tareas diarias a realizar por su personal o en los presupuestos ordinarios.

Para solucionar esta falta de recursos, sabemos que Novella se dirigió a la Diputación de Girona y en su libro de actas encontramos (Arxiu Històric de Girona, Fons Diputació, sig. 27, p. 48, acta de la reunió del día 9 de febrero de 1917): «Proponiendo, en méritos de instancia suscrita por D. Joaquín Novella Valero, esta ciudad, se acuerde conceder una subvención anual de 500 pesetas para el sostenimiento de la estación sismológica instalada en dicho centro docente, por mientras el Estado no atienda a este servicio y la Diputación no acuerde lo contrario; satisfaciéndose esta cantidad por lo que afecta a este año con cargo al capítulo de Imprevistos; y se aprobó».

No sabemos durante cuántos años se mantuvo esta situación. Hemos encontrado uno de estos ingresos en el Libro de cuentas del instituto (Arxiu Històric de Girona, Flns, sig., 1536, p. 57) en fecha 2 de enero de 1919: «material del Sismog. que pasa en c/ aparte. 500». También, en el mismo libro. y desde 1916 a 1921, encontramos diferentes cargos de pequeños gastos ocasionados por el sismógrafo. También en estos años, y aunque su mantenimiento no se contemplaba en los presupuestos ordinario, se dedicaron otras partidas presupuestarias al instrumento, tal y como reflejan las memorias del Instituto. Hemos encontrado que en el curso 1917-18 se realizaron reformas en la sala de registro y se adquirió un cronómetro de tiempo medio (mIGyTG, 1917-18, p. 8) y el curso siguiente accesorios no determinados y un mueble para guardar sismogramas (mIGyTG, 1918-19, p. 11).

Es un hecho totalmente constatado que desde noviembre de 1916 hasta finales de 1919 el sismógrafo debió funcionar correctamente. Nos lo demuestra, por una parte, la mención a sus registros, en el caso de algunos terremotos peninsulares de cierta importancia, en el Diari de Girona y también en revistas científicas (Fontserè, 1918a, 1918b) y, por otra, la anotación regular de los terremotos registrados por el aparato del instituto y que encontramos en el Diario de Observaciones del Observatorio Fabra. En este diario hemos contabilizado hasta un total de cuarenta y nueve anotaciones de registros de terremotos obtenidos por el aparato de Girona. La primera aparece con fecha 21 de noviembre de 1916 y la última de 29 de noviembre de 1919. Pasada esta fecha ya no encontramos ninguna otra referencia a registros sísmicos en la estación de Girona. Sólo Fontserè (1921, 1923) nos informa de la existencia del sismógrafo. Un hecho que refuerza la hipótesis del fin del registro sísmico (al menos de forma regular y sistemática) en los umbrales del año 1920 es la ausencia del Dr. Novella, que cesó como profesor del centro el 1 de marzo de 1919 por traslado al instituto de Sevilla. Sabemos por referencias de los exalumnos del Instituto que el rótulo «Sismógrafo» se conservó sobre la puerta hasta la Guerra Civil (E. Mirambell, comunicación personal). No hemos podido averiguar, sin embargo, si el aparato se encontraba todavía (período 1921-1939) en el interior de la habitación o no. Por la memoria de algunos exalumnos parece que efectivamente el aparato existió hasta la Guerra Civil. Por ejemplo, la familia de Baldomer Busquets, que estudió en el Instituto los años inmediatamente anteriores a la guerra, recuerda que les explicaba cómo era costumbre saltar y dar portazos cerca del lugar donde se encontraba el aparato para perturbar el registro. También podría ser que algunos de los alumnos aventajados de «ciencias» colaboraran en el mantenimiento regular del registro, como se hacía en el caso de la estación meteorológica instalada en el mismo instituto. Sin embargo, no hemos podido confirmar este último punto.

LOS APARATOS DE REGISTRO

Describamos brevemente las características técnicas de la estación sísmica de Girona y de sus instrumentos. El primer dato de interés para el estudio de la sismología son las coordenadas de la estación. Daremos, pues, las correspondientes a la estación meteorológica que se encontraba en el mismo edificio del viejo Instituto de Gerona: Latitud 41° 59' 15"N; longitud 2° 40' 2" E. Como ya hemos dicho, en la estación sísmica se utilizaron dos instrumentos distintos. El primero, entre 1909 y 1912/13, fue un sismoscopio Vicentini. El segundo, llegado en 1913, es un sismógrafo del tipo llamado Péndulo bifilar Mainka.

Respecto al sismoscopio Vicentini, suponemos que era un instrumento original construido por G. Vicentini, de la Universidad de Padua. También suponemos que debería adquirirse directamente al Dr. Vicentini. Por otra parte, no hemos encontrado ningún rastro del instrumento que funcionó en Girona; pero conocemos bien las características de este tipo de aparatos, que ha sido descrito por diferentes autores (Godeaux, 1909; Ferrari, 1992). En la figura 2 reproducimos uno de estos aparatos y una vista más

cercana de su mecanismo amplificador y inscriptor. Se trataba de un péndulo formado por una barra de 40 cm. de largo terminada en una masa pendular de 10 kg. El período de este péndulo era de 1.2 s y el mismo se encontraba suspendido de una barra de hierro mucho más gruesa y curvada hasta 90° en su extremo superior. Esta segunda barra se encontraba sólidamente fijada a un muro y sostenía todo el sistema. Las oscilaciones del péndulo respecto a su soporte indicaban la ocurrencia de un terremoto. Para registrarlas gráficamente, en la parte baja del último se habían fijado dos soportes que sostenían las diferentes partes del llamado mecanismo inscriptor. El primer soporte fijado inmediatamente debajo de la masa pendular servía de punto de suspensión para una palanca destinada a aumentar las oscilaciones de la masa. El segundo soporte sostenía la placa de vidrio ahumado sobre la que se inscribía el registro y un ligero pantógrafo de latón movido por la punta de la palanca anterior. El mecanismo inscriptor aumentaba 20 veces el movimiento de la masa (10 la palanca x 2 el pantógrafo) y terminaba en una punta de vidrio que dibujaba la traza sobre una placa de vidrio convenientemente ahumada y dispuesta en posición horizontal. Se hace evidente por las fotografías que este aparato sólo registraba las componentes horizontales del movimiento del suelo.

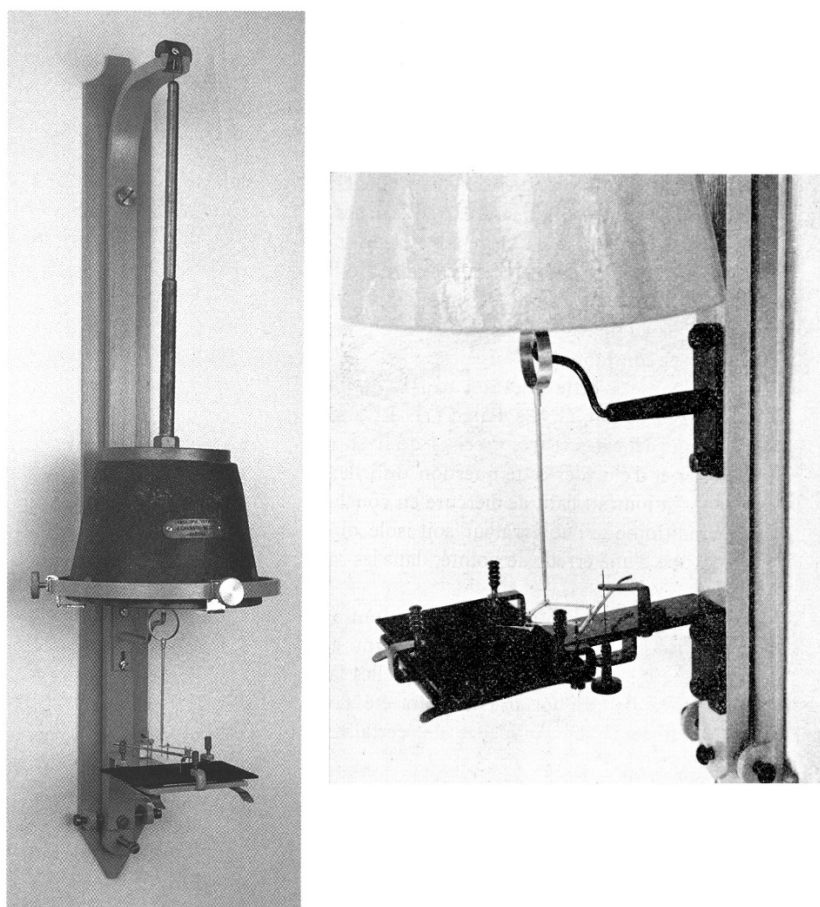


Figura 2: Imagen del sismoscopio Vicentini (izquierda) y detalle del mecanismo inscriptor (derecha). De Godeaux (1909).

Como ya hemos explicado en la introducción, el registro obtenido por un aparato de este tipo no tenía ninguna referencia temporal. Por tanto, cuando se producía un terremoto su movimiento quedaba registrado por el instrumento; pero el aparato no disponía de ningún mecanismo que nos indicara la hora en la que se producía el registro. También reproducimos uno de los registros de este aparato (figura 5) y se puede comprender fácilmente que la información que puede extraerse respecto a un terremoto es muy escasa. Así, para saber la hora en la que se había producido el terremoto era normal en la época complementar el sistema con un avisador que ponía en marcha un reloj cuando se producía un movimiento del péndulo. Así, hemos encontrado que el sismoscopio Vicentini se completó con un “sismoscopio avisador eléctrico y un reloj de 24 horas” (mIGyTG, 1908-09, p. 13). No sabemos exactamente cómo era este último aparato. Por lo general, consistían en pequeñas masas puestas en equilibrio inestable que, al caer por la vibración del suelo durante un terremoto, cerraban un circuito eléctrico que hacía sonar un timbre y, al mismo tiempo, ponían en marcha el péndulo de un reloj que permitía así saber la hora en que se había producido el terremoto. Como también se ha dicho, el conjunto de los aparatos se instaló en el laboratorio de historia natural.

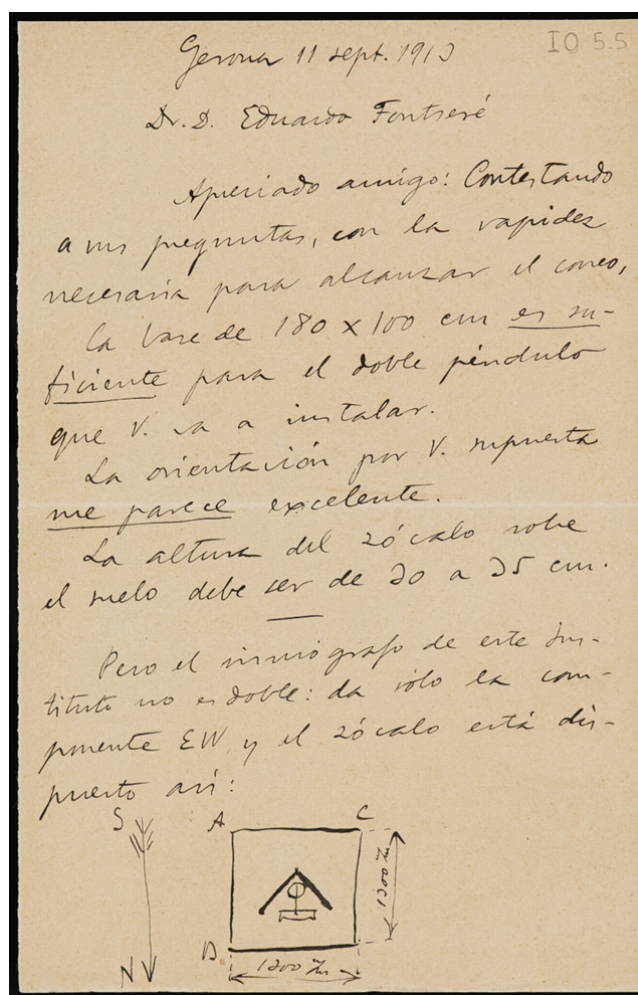


Figura 3: Inicio de una carta de J. Estalella a E. Fontserè en donde el primero da detalles de la instalación del sismógrafo Mainka en el Instituto de Girona (archivo del Observatorio Fabra).

El segundo aparato, el péndulo bifilar Mainka, era ya un auténtico sismógrafo, tal y como los conocemos hoy en día. En el Observatorio Fabra todavía pueden contemplarse aparatos de este modelo en funcionamiento. Se adquirió a la casa Bosch de Estrasburgo (ciudad entonces parte de la Alemania imperial), que era un reconocido fabricante de estos aparatos. También consta que el sismógrafo se adquirió «con cronógrafo y accesorias» (mIGyTG, 1913-14, p. 21). Dado que estos instrumentos sólo registraban el movimiento horizontal del suelo en una sola dirección, era normal instalarlos por pares (como podemos ver en el Observatorio Fabra). No es éste el caso en que, suponemos por economía, se adquirió un único aparato. Hasta muy recientemente, cuando encontramos nueva información en el archivo del Observatorio Fabra, desconocíamos la orientación y masa del instrumento. Ahora, por una carta de J. Estalella (véase la figura 3), catedrático entonces de física y química en Girona, a E. Fontserè, sabemos que el instrumento registraba el movimiento en la dirección E-W y su masa oscilante era de 135 Kg. igual que los instalados en el Observatorio Fabra. Podemos encontrarlo en el catálogo de instrumentos de la casa Bosch (1910). Asimismo, era del mismo modelo que los adquiridos poco antes por la Sociedad Astronómica de España y América (SADEYA, Comas y Solà, La Vanguardia, 23 de abril de 1913). Esta carta, por su fecha y por las indicaciones que da, nos induce a pensar que Estalella tomó el relevo de Cazurro en la instalación del nuevo instrumento en Girona y que ésta se hizo en paralelo, si no antes, que los del Observatorio Fabra y que quien dio indicaciones para seleccionar este instrumento y no otro de los existentes en el mercado podría ser Comas y Solà o el mismo Cazurro, y no Fontserè como pensábamos hasta el momento. La marcha de Estalella a Madrid el mes siguiente a la fecha de la carta frustró nuevamente los proyectos en marcha. En la figura 4 reproducimos uno de estos sismógrafos en una fotografía publicada en un libro de la época. Un hecho curioso es que este aparato nunca dispuso de una referencia de tiempo absoluta, aunque sabemos explícitamente que se adquirió «con cronógrafo» y que en 1918 se adquirió también «un cronómetro de tiempo medio para la estación sismológica» (mIGyTG, 1917-18, p. 8). Esto apunta la posibilidad de que estos relojes nunca funcionaron bien o, más probable, que no se pudo realizar una instalación adecuada (recordemos que, aparte de los relojes, se hacía necesario instalar algún tipo de mecanismo que hiciera que las agujas inscriptoras del sismógrafo

marcaran los minutos y las horas). Como hemos dicho también, el aparato se instaló en la planta baja del edificio en una habitación situada entrando por la plazoleta a mano derecha, pasada la actual puerta de ingreso en el archivo y la escalera que nos lleva a los pisos superiores, y sobre una base o pilar de hormigón (mIGyTG, 1913-14, p. 21).

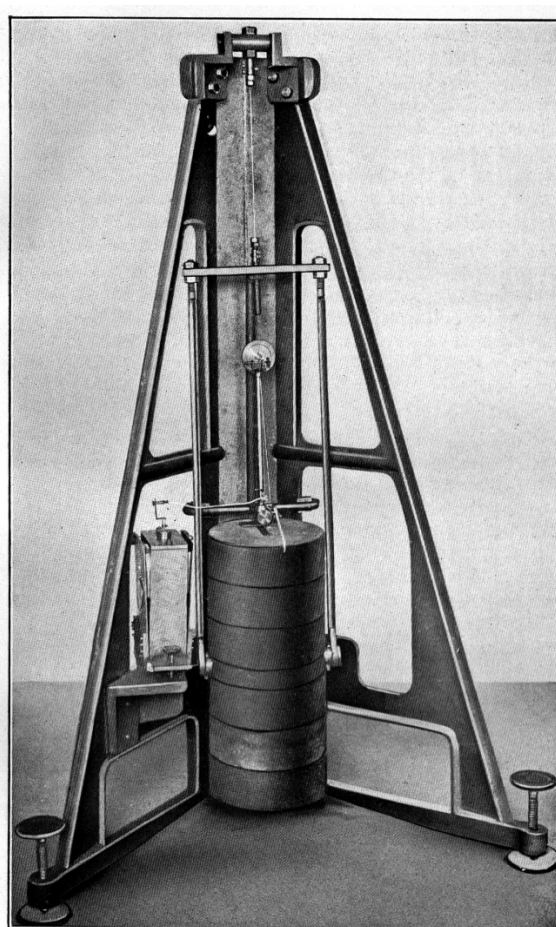


Figura 4: Aspecto del soporte y masa oscilante del sismógrafo Mainka. En la parte superior de la masa se observa la plumilla inscriptora; pero en la imagen se prescinde del mecanismo y papel de registro (de Hobbs i Ruska, 1910).

Una carta de Miquel Saderra-Masó a Eduard Fontserè, conservada en el archivo personal de este último y que se encuentra en el Institut Cartogràfic de Catalunya (Fons Fontserè, sig. FF-27) nos aporta una descripción de primera mano de la instalación. El primero, jesuita catalán natural de Olot, era el jefe de la sección sísmica del Observatorio de Manila, en las islas Filipinas. En una estancia en la Península Ibérica que realizó en 1920 aprovechó para visitar diferentes observatorios sísmicos, entre ellos los de Girona y Olot y, con fecha 16 de abril, describió a Fontserè sus experiencias en Girona: «El Instituto de Gerona posee una componente Mainka en buen estado, pero sin funcionar bien. No puede dar la hora por falta de corriente y conexión con el reloj; la razón es porque no hay dinero para las pilas. Cuida del aparato uno de los Conserjes, y esto solo por compasión que le da el verlo abandonado; cambia de vez en cuando el papel y nada más. Existe allí además un péndulo pequeño de 15 ó 20 kilos y unos 50 centímetros de longitud, que llaman de Vicentini, tiene un pequeño pantógrafo y registra sobre un cristal ahumado; es la primera vez que veo semejante aparato; no sé quién lo construyó».

Como vemos, sólo existía una componente del sismógrafo Mainka y el problema de las señales de tiempo no estaba en el reloj, sino en las conexiones eléctricas. Es de mucho interés la información sobre el Sismoscopio Vicentini (Saderra-Masó erra su apreciación de la masa) ya que hasta ahora no sabíamos que éste todavía existía en 1920. No nos dice dónde estaba instalado. Podríamos especular con la posibilidad de que se movió del laboratorio de ciencias naturales a la sala en donde se encontraba el sismógrafo Mainka, en la planta baja.

LOS REGISTROS

Uno de los principales objetivos que nos fijamos al empezar este trabajo era la posible recuperación de los registros de la estación sísmica de Girona, para así poder reestudiar los terremotos allí registrados. El éxito ha sido muy parcial.

Del estudio de los diferentes documentos hallados, hemos obtenido referencias sobre el registro de 7 terremotos, como mínimo, por parte del Sismoscopio Vicentini; Estos son los correspondientes a las fechas 1909/04/06 (Comas y Solà, 1909), 1909/04/10 (Quintana, 1938), 1909/04/23 y 1909/06/11 (mIGyTG, 1908-09, p.13), 1911/07/12 (La Vanguardia, 15-VII. p. 2), 1911/07/24 (Comas y Solà, 1912), 1912/03/20 y 1912/09/15 (Comas y Solà, 1913). También Comas y Solà (1911) reproduce el registro de este sismoscopio correspondiente al terremoto del día 24 de julio de 1911 y que, por su interés, reproducimos aquí (figura 5). Éste es el único ejemplo conservado de registro de un terremoto por un sismoscopio en toda la península Ibérica. Como ya hemos dicho, estos registros se obtenían mediante el registro del movimiento de la masa pendular con un sistema de amplificación-inscripción terminado en una punta de vidrio que se movía sobre una placa de vidrio ahumada mediante el humo de una lámpara de aceite o petróleo. Una vez obtenido el registro, se retiraba con cuidado la placa de vidrio de su soporte y se le daba un baño con goma laca disuelta con alcohol, quedando así fijado el negro de humo.

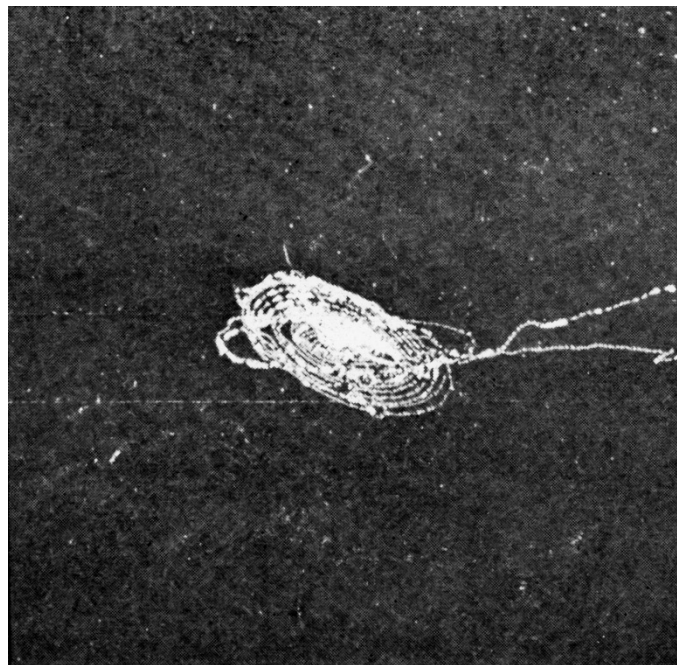


Figura 5: Registro del terremoto local de fecha 24 de julio de 1911 obtenido por el sismoscopio Vicentini del Instituto de Girona (de Comas y Solà, 1911).

También por Comas y Solà tenemos constancia de que Cazorro hizo copias de otros registros obtenidos con el sismoscopio Vicentini. El primero es del gran terremoto portugués del 23 de abril de 1909 (La Vanguardia, 30-IV, p. 6), otro corresponde al gran terremoto de Provenza del 11 de junio (La Vanguardia, 13-VI, p. 8). Sin embargo, no hemos podido encontrarlos.

Para terminar el apartado referente a los registros del sismoscopio Vicentini diremos que nos parece muy dudoso el registro del día 10 de abril de 1910 mencionado en Quintana (1938), aunque él atribuye el origen de la información al propio Fontserè. No tenemos constancia de ningún terremoto que se produjera en aquella fecha, y muy probablemente corresponde a la fecha en que se publicó en los periódicos la noticia del registro en Girona del terremoto del día 6 anterior.

De los registros del sismógrafo Mainka, como ya hemos dicho antes, conservamos casi una cincuentena de referencias en el Observatorio Fabra (DdOb), También conservamos un registro original, la banda correspondiente a los días 28 y 29 de noviembre de 1919, y dos contactos fotográficos correspondientes a los terremotos de los días 25 de diciembre de 1916 y 7 de septiembre de 1918, todos ellos hallados en el Observatorio Fabra de Barcelona. Recientemente localizamos en el observatorio barcelonés casi doscientos sismogramas de correspondientes al sismógrafo instalado en Girona, mayormente de los años 1918 y 1919 y hemos procedido a su clasificación y posterior rasterización. Estos registros se obtenían en bandas de papel ahumado, de un tamaño de

90x15 cm aproximadamente, y la velocidad de registro era de 15 mm/min aproximadamente. No se encuentran marcas de tiempo en los registros, lo que confirma el mal funcionamiento (sí es que alguna vez funcionó) del sistema de registro del tiempo. En esta segunda época las bandas (registros) se enviaban semanalmente al observatorio Fabra para su análisis (Fontserè, 1921). Suponemos que, una vez analizadas, se devolvían a Girona y por eso se adquirió un mueble para guardar sismogramas, según consta en las memorias del Instituto (mIGyTG, 1918-19). También suponemos que esto sólo se hizo durante un tiempo, y más tarde se abandonó esta práctica.

CONCLUSIONES

A modo de conclusiones diremos que en este trabajo hemos revisado el estado actual del estudio de fondos documentales que nos han permitido elaborar una breve historia de la estación sísmica que estuvo en servicio en el Instituto de Girona y de su instrumentación. Así, el Instituto de Girona dispuso de dos equipos de registro diferentes, un sismoscopio Vicentini y un sismógrafo Mainka, que funcionaron de forma consecutiva en el tiempo cubriendo un período que se extiende, con interrupciones, desde 1909 hasta, por lo menos, 1919. No se ha podido hasta el momento localizar los instrumentos originales. Hemos localizado algunos de sus registros y estamos, actualmente, analizándolos para extraer el máximo posible de la información sísmica que contienen. También hemos esbozado la operativa que se seguía en la estación.

REFERENCIAS

- [1] Batlló, J. (1998): "Els antics sismògrafs de l'Institut de Girona". En: Actes de les IV Trobades d'Història de la Ciència i de la Tècnica. Barcelona, Institut d'Estudis Catalans, 479-486.
- [1] Batlló, J. (2003): "Els antics sismògrafs de l'Institut de Girona". Revista de Girona, núm. 216, 36-43. Accesible en: http://www.revistadegirona.cat/recursos/2003/0216_036.pdf.
- [2] Batlló, J. (2004): Catálogo - Inventario de Sismógrafos Antiguos Españoles. Instituto Geográfico Nacional, Madrid., 414 pp. Accesible en: <http://www.ign.es/web/resources/sismologia/publicaciones//Catalogosismografos.pdf>.
- [3] Bosch, J. (1910): Katalog Nr. 22, Seismiche Apparate-Instrumente, Strassburg, J. & A. Bosch.
- [4] Comas y Solà, J. (1909): «Nota sobre el terremoto Olotino del 6 de Abril de 1909 y el terremoto peninsular del 29 de Abril de 1909», Mem. R. Acad. Cien. y Artes de Barcelona, VIII (6), 75-84.
- [5] Comas y Solà, J. (1911): "El terremoto pirenaico del 24 de julio de 1911". Revista de la Sociedad Astronómica de España, I (6), 81-83.
- [6] Comas y Solà, J. (1912): "Estadística sismològica de 1912". Mem. R. Acad. Cien. y Artes de Barcelona, X (12), 231-249.
- [7] Comas y Solà, J. (1913): "Resumen sísmico de 1912 y 1913". Mem. R. Acad. Cien. y Artes de Barcelona, X (27), 553-569.
- [8] Estrach, J. (1995): "Records d'un batxiller (1931-1937)". En: Lajo, R. (dir.): Miscel·lània I. B. "Jaume Vicens Vives" 150 anys, Girona, L'Eix Editorial, 171-180.
- [9] Ferrari, G. et al. (1992): "Vicentini recording seismoscope". En: Ferrari, G. (ed.): Two hundred years of seismic instruments in Italy 1731-1940, Bologna, SGA Storia-Geofisica-Ambiente, 149-151.
- [10] Fontserè, E. (1918a): "Terremotos observados en la región Iberopirenaica desde Junio a Octubre de 1917". Mem. R. Acad. Cien. y Artes de Barcelona, XIII (27), 407-423.
- [11] Fontserè, E. (1918b): "Terremotos observados en la región Ibero-Pirenáica desde Noviembre de 1917 a Febrero de 1918". Mem. R. Acad. Cien. y Artes de Barcelona, XIV (7), 403-408.
- [12] Fontserè, E. (1921): "Pla per a la instauració d'un servei meteorològic català". Crònica oficial de la Mancomunitat de Catalunya, II (5), 126-133.
- [13] Fontserè, E. (1923): "Sismología de España". En: Enciclopedia Universal Ilustrada Europeo Americana, Madrid, Espasa-Calpe S. A., LXX: XXI, 66-77.

- [14] Godeaux, L. (1909): "Le sismoscope enregistreur de M. Giuseppe Vicentini". Bulletin de la Société Belge d'Astronomie, XIV, 151-155.
- [15] Hobbs, W.K. y Ruska, J. (1910): Erdbeben, Leipzig, Verlag von Quelle & Meyer, 274 p. + 30 lam.
- [16] Julià, B. (1995): "Records d'un batxiller de 1927 a 1932". En: Lajo, R. (dir.): Miscel·lània I. B. "Jaume Vicens Vives" 150 anys, Girona, L'Eix Editorial, 217-224.
- [16] Lajo, R. (dir.) (1995): Miscel·lània I. B. "Jaume Vicens Vives" 150 anys, Girona, L'Eix Editorial.
- [17] Mallarach, J. M. (1985): "El risc sísmic a la Garrotxa. Del sismògraf de l'Hospici (1907) a l'estació sismològica del Museu de Ciències Naturals". l'Olotí, núm. 307, 10-11.
- [18] Pascual, P. (1976): El professor don Manuel Cazorro i Ruiz i l'Institut de Girona del seu temps. Girona, Associació Arqueològica de Girona, 91 p.
- [19] Quintana, A. (1938): "Assaig sobre el clima d'Olot". Notes d'Estudi, núm. 69, Servei Meteorològic de Catalunya, 5, 1-80.

Análisis de la aportación de las técnicas geoespaciales y la inteligencia artificial en el estudio de la exposición sísmica en ciudades prioritarias de Centroamérica y Caribe

Analysis of the contribution of geospatial techniques and artificial intelligence in the study of seismic exposure in priority cities in Central America and the Caribbean

RODRÍGUEZ-SALIZ, Javier ^(1,2); UREÑA-PLIEGO, Miguel ⁽¹⁾; GARCÍA-LANCHARES, Carlos ^(1,3); REJAS-AYUGA, Juan Gregorio ⁽¹⁾; GONZÁLEZ-RODRIGO, Beatriz ⁽⁴⁾; MARCHAMALO-SACRISTÁN, Miguel ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Departamento de Ingeniería y Morfología del Terreno. Universidad Politécnica de Madrid. España.

⁽²⁾ Buin Ingenieros, Madrid, España.

⁽³⁾ Detektia Earth Surface Monitoring, S.L., Madrid, España.

⁽⁴⁾ Departamento de Ingeniería y Gestión Forestal. Universidad Politécnica de Madrid. España.

Autor correspondiente: miguel.marchamalo@upm.es

SUMMARY

In some regions of the planet, such as in Central America, the seismic hazard significantly influences the development of human settlements in the region, making the study of the associated risk essential. One of the main processes in the analysis of seismic risk is the study of seismic exposure. An increasingly widespread method is the one proposed by the GEM (Global Earthquake Model), which characterizes buildings by means of 13 attributes that characterize their seismic exposure.

This research evaluates the possibilities of the application of geospatial techniques and artificial intelligence in the study of seismic exposure in Central American capital cities. With these tools, several GEM attributes have been obtained for the entire population studied, such as footprint area and shape, roof material, year of construction, relative position of the building within a block, percentage of the block area occupied by buildings and building height. In addition, machine learning algorithms are applied to geospatial databases to infer the construction system of buildings.

Subsequently, considering the predefined classes a Random Forest algorithm was run to predict the construction system class of the buildings from geospatially calculated attributes. Following this process, an error of 13,55% was obtained in the prediction of the building class.

Geospatial techniques and artificial intelligence allow for rapid and massive acquisition of key attributes for seismic exposure. However, they do not allow the structures to be fully characterized, requiring a statistically representative field sample. Geospatial techniques allow the optimization of field surveys and are essential in emergencies cases and quick assessment studies.

This research has been carried out with the support of the Industrial Doctorates of the Community of Madrid (IND2020/TIC-17528 IND2023/TIC-28743), Adelante 2 UE-Costa Rica-Caribbean Funds and SIAGUA project Spanish National Research Program.

PALABRAS CLAVE

Exposición sísmica, geomática, SIG, San José, Centroamérica

INTRODUCCIÓN

La exposición sísmica de una población es esencial para estimar su respuesta ante un evento sísmico. Conocer la exposición sísmica de una región puede ser muy beneficioso para adecuar la planificación urbanística de la misma y poder reducir el riesgo ante un evento de estas características y para la gestión de emergencias una vez ha ocurrido un episodio sísmico importante.

Esta exposición sísmica se puede evaluar de distintas formas, según distintas instituciones y organizaciones regionales y mundiales. En Centroamérica se está extendiendo el método planteado por la fundación Global Earthquake Model [1] para evaluar la exposición sísmica de las estructuras de un lugar. El método se basa en la caracterización de 13 atributos de la estructura con diferentes niveles de detalle para definir la clase de exposición.

En el cantón de San José (Costa Rica) se han realizado diferentes estudios sobre riesgo sísmico para poder prevenir a la población

ante un evento de gran magnitud [2]. Uno de los más recientes trabajos en este ámbito, lo realizó el Laboratorio de Ingeniería Sísmica de la Universidad de Costa Rica en el que el estudio de la exposición sísmica consistió en la caracterización con todo detalle una muestra de 7.296 edificios [3]. Tras completar este inventario, se siguió la metodología propuesta por el GFZ (Centro de Investigaciones en Geociencias) que agrupa las edificaciones en un número limitado de clases para así poder trabajar de una forma más sencilla con la muestra y dar una visión de conjunto de la situación de la ciudad [4].

El objetivo de este trabajo es el análisis de la potencialidad de empleo de las técnicas geomáticas en este ámbito. Con esto, se pretende estimar el aporte de las mismas para facilitar el estudio de la exposición sísmica de un territorio con datos de libre acceso disponibles para cualquier lugar del mundo.

METODOLOGÍA

Este estudio se ha realizado en el cantón de San José (Costa Rica) contando con los datos del trabajo previo de la Laboratorio de Ingeniería Sísmica de la Universidad de Costa Rica [5]. De esta forma, se ha empleado la muestra de 7.296 edificios [3] de la que se conocen los atributos de la taxonomía GEM como entrenamiento y validación de las técnicas geomáticas descritas en las siguientes líneas. En la realización del presente estudio, se propone una metodología para estimar algunos atributos de la taxonomía GEM (resaltados en la Tabla 1) a partir de técnicas geomáticas.

A continuación, se explican los pasos seguidos para obtener cada uno de estos atributos.

Altura

Para obtener la altura de los edificios se parte de los datos obtenidos de un vuelo LIDAR. Los vuelos LIDAR generan nubes de puntos en archivos habitualmente de tipo .laz. Los archivos de tipo .laz clasifican los puntos de la nube distinguiendo los puntos que pertenecen a distintas clases como edificios, vegetación, suelo desnudo... A partir de estas nubes de puntos, se realiza un modelo digital de alturas de edificios. El resultado es un modelo en el que se obtiene la altura de los edificios, con valor nulo en el suelo desnudo y la altura correspondiente en los edificios.

En caso de no disponer de datos obtenidos mediante LIDAR, en la plataforma OpenStreetMap [6] se puede consultar la altura de edificios, aunque lo habitual es solo encontrar este dato en edificios singulares o en zonas concretas de las ciudades.

Año/período de construcción

El año de construcción de los edificios se ha obtenido directamente de un producto de libre acceso que se puede descargar online. El JRC (Joint Research Center) de la Comisión Europea pone a disposición de los usuarios una capa de asentamientos humanos globales que cubre la Tierra en su totalidad [7]. Esta capa indica la época en la que se construyeron los edificios de un lugar (antes de 1975, entre 1975 y 1990, desde 1990 hasta 2000 y finalmente desde 2000 hasta 2014) con una resolución espacial de 30 metros.

Posición de un edificio dentro de un bloque

La posición de un edificio dentro de un bloque requiere tener definidos los bloques además de las huellas de los edificios. Estos bloques son equivalentes a las manzanas o cuadras, entendidas como las agrupaciones de edificios delimitadas en su perímetro por calles u otras vías de comunicación o, en su defecto, por el terreno sin construir. La obtención de las manzanas se puede hacer por diferentes métodos, desde la digitalización manual hasta la delimitación como espacio entre zonas conocidas.

Una vez se tienen las manzanas se pueden hacer diversos cálculos para definir la posición de los edificios en el agregado que es la manzana. En primer lugar, se pueden detectar los edificios que se encuentran aislados, sin ninguna otra edificación colindante. Además, resulta de gran utilidad obtener el porcentaje de la manzana ocupado por los edificios que la componen, relacionando el área de los elementos. Así se pueden discriminar manzanas con los edificios disgregados y las manzanas con los edificios muy juntos, incluso apoyados unos en otros, con una mayor densidad de construcción.

Tabla 1: Atributos y niveles de la taxonomía GEM. En negrita, los analizados por técnicas geoespaciales.

Grupo de atributos	#	Atributos	Nivel del atributo
Sistema estructural	1	Dirección	Dirección del edificio

	2	Material del sistema de resistencia de cargas laterales	Tipo de material (nivel 1)
			Tecnología del material (nivel 2)
			Propiedades del material (nivel 3)
	3	Sistema de resistencia de cargas laterales	Tipo de sistema de resistencia de cargas laterales (nivel 1)
			Ductilidad del sistema (nivel 2)
Información del edificio	4	Altura	Altura
	5	Fecha de construcción o rehabilitación	Año de finalización de construcción
	6	Uso	Clase general de uso del edificio (nivel 1)
			Clase detallada de uso del edificio (nivel 2)
Atributos exteriores	7	Posición del edificio dentro de un bloque	Posición del edificio dentro de un bloque
	8	Forma en planta del edificio	Huella del edificio
	9	Irregularidad estructural	Regular o irregular (nivel 1)
			Irregularidad en planta o irregularidad vertical (nivel 2)
			Tipo de irregularidad (nivel 3)
Cubierta / forjados / cimentación	11	Cubierta	Muros exteriores
			Forma de la cubierta (nivel 1)
			Cobertura de la cubierta (nivel 2)
			Material del sistema de la cubierta (nivel 3)
			Tipo de sistema de la cubierta (nivel 4)
	12	Forjados	Conexiones de la cubierta (nivel 5)
			Material del sistema de los forjados (nivel 1)
			Tipo de sistema de los forjados (nivel 2)
	13	Sistema de cimentación	Conexiones de los forjados (nivel 3)
			Sistema de cimentación

Huella del edificio

La huella de los edificios se puede obtener como producto descargado de OpenStreetMap [6]. Para ello existen aplicaciones específicas para programas como QGIS que se pueden descargar dentro del programa y así poder descargar información de OpenStreetMap. Alternativamente, existe un producto de Bing (Microsoft) que es de libre acceso y permite descargar por países la huella de todas las edificaciones que han detectado en los mapas de Bing [8]. Ambas opciones pueden ser adecuadas si no se dispone de información que pueda tener una mayor fiabilidad de las administraciones correspondientes a la zona de estudio. La correcta definición de las huellas de los edificios es fundamental para obtener unos resultados adecuados en este tipo de proyectos, por lo que puede resultar necesario realizar un trabajo previo de depuración de este dato. Una vez se han obtenido estos polígonos, se añaden al proyecto de GIS en el que se esté trabajando y se calcula el área de estos polígonos como un atributo de estos.

Irregularidad en planta

Para valorar la irregularidad en planta se ha calculado el índice de Polsby-Popper [9] de los polígonos de las huellas de los edificios de forma similar a la superficie en el caso anterior. Este índice, cuyo rango es de 0 a 1, permite valorar la regularidad de un polígono en función de su área y perímetro, siendo la unidad el valor correspondiente a un círculo y su circunferencia, pues es la forma geométrica que ocupa mayor superficie para un mismo perímetro. A partir de este parámetro, se pueden establecer unos umbrales para discriminar los edificios con una forma regular en planta de los edificios irregulares.

Cobertura de la cubierta

El estudio de las cubiertas permite identificar el material de la cobertura de las cubiertas de los edificios. Para ello se emplean imágenes multi o hiperespectrales. Una fuente sencilla para obtener imágenes multiespectrales es la descarga de imágenes

satelitales Sentinel-2 [10], que son de acceso gratuito. También son de acceso libre las imágenes hiperespectrales ASTER [11] si se prefiere el uso de ellas. Adicionalmente, se puede dar el caso de que se tenga acceso en la zona de estudio a otras imágenes hiperespectrales con una mejor resolución espectral que puedan ser utilizadas en lugar de estas y permitan diferenciar con mayor exactitud los diferentes materiales.

La obtención de este dato requiere un exhaustivo preproceso de las imágenes para poder tener una imagen que permita mejorar los resultados finales. La imagen final con la que se trabaja es el producto de fusionar la imagen hiperespectral con una ortofoto. De esta forma, se consigue una imagen que tenga una buena resolución espectral (gracias a la imagen hiperespectral) y una buena resolución espacial (gracias a la ortofoto). Con esta imagen, se procede a la clasificación de los materiales de las cubiertas de las estructuras en el ámbito de estudio.

CLASIFICACIÓN DE LOS EDIFICIOS POR MACHINE LEARNING

Tras caracterizar los edificios se debe proceder a su clasificación para poder trabajar de forma eficaz con toda la población del área estudiada. En el caso del cantón de San José se definieron las siguientes clases:

Tabla 2: Clases de sistema constructivo definidas para las edificaciones de San José.

ID	NOMBRE	MATERIAL	NÚMERO DE PLANTAS
A	MCF.A	Mampostería confinada	1
B	MCF.B	Mampostería confinada	2 o más
C	CR.A	Hormigón armado o pretensado	1 – 5
D	CR.B	Hormigón armado o pretensado	6 – 10
E	CR.C	Hormigón armado o pretensado	11 o más
F	S/W.A	Acero o madera	1
G	S.B	Acero	2 o más
H	INFOR	Construcciones informales	

Se ha utilizado el algoritmo Random Forest en el software R para desarrollar un modelo que estime la clase de sistema constructivo en función de las variables geoespaciales. Random Forest es una técnica de aprendizaje supervisada basada en árboles de decisión que se emplea habitualmente para resolver problemas de clasificación y regresión. El algoritmo fue entrenado con los datos del trabajo del Laboratorio de Ingeniería Sísmica de la Universidad de Costa Rica y la clasificación planteada en su propio estudio. Posteriormente, se procedió a la clasificación en las 8 clases propuestas (Tabla 2) utilizando únicamente los parámetros obtenidos mediante técnicas geomáticas. Los resultados obtenidos obtuvieron un ratio estimado de error del 13,55%, que se elevó al 46,22% en el caso de no contar con el dato de la altura de las edificaciones.

CONCLUSIONES

Las técnicas geomáticas permiten la obtención de varios atributos de la taxonomía GEM de forma rápida para grandes conjuntos de edificaciones. No obstante, con la tecnología disponible actualmente, esta caracterización de las estructuras no es completa. El estudio de la exposición sísmica mediante técnicas geomáticas es un campo promisorio en el que ya se han realizado avances que permiten realizar el estudio de forma parcial siguiendo esta metodología, pudiendo ampliarse la lista de atributos que se puedan caracterizar de este modo en un futuro próximo.

Se presenta y valida una propuesta metodológica para realizar una primera aproximación a la exposición sísmica de un territorio con varias utilidades, como son la valoración rápida de la situación en caso de emergencia o un estudio preliminar de la situación para así optimizar los recursos disponibles para el estudio de la exposición sísmica en profundidad y seleccionar de forma más adecuada la muestra a estudiar en campo.

Esta investigación se ha realizado con el apoyo del Programa de Doctorados Industriales de la Comunidad de Madrid (proyectos IND2020/TIC-17528 e IND2023/TIC-28743), del Proyecto de Cooperación Triangular UE-Costa Rica-ALC "Construcción sostenible y resiliente en Centroamérica y el Caribe ante la amenaza sísmica: cooperación regional basada en la experiencia de Costa Rica" y del proyecto SIAGUA, con referencias PID2021-128123OB-C21 y PID2021-128123OB-C22 financiado por MCIN/AEI/FEDER, UE.

REFERENCIAS

- [1] S. Brzev et al., "GEM Building Taxonomy Version 2.0," Pavia, Italy, 2013. doi: 10.13117/GEM.EXP-MOD.TR2013.02.
- [2] L. Navas-Sánchez et al., "A methodology to assess and select seismic fragility curves: Application to the case of Costa Rica," *Earthquake Spectra*, vol. 39, no. 3, pp. 1380–1409, Aug. 2023, doi: 10.1177/87552930231171177.
- [3] L. C. Esquivel-Salas, V. Schmidt-Díaz, M. Pittore, D. Hidalgo-Leiva, M. Haas, and A. Moya-Fernández, "Remote structural characterization of thousands of buildings from San Jose, Costa Rica," *Front Built Environ*, vol. 8, Sep. 2022, doi: 10.3389/fbuil.2022.947329.
- [4] M. Pittore, M. Haas, and K. G. Megalooikonomou, "Risk-oriented, bottom-up modeling of building portfolios with faceted taxonomies," *Front Built Environ*, vol. 4, Jul. 2018, doi: 10.3389/fbuil.2018.00041.
- [5] L. C. Esquivel-Salas, V. Schmidt-Díaz, M. Pittore, D. A. Hidalgo-Leiva, M. Haas, and A. Moya-Fernández, "Dataset of the attributes affecting seismic performance of a sample of buildings from San José-Costa Rica," *Mendeley Data*, 2021. doi: 10.17632/8BY7R5SZCN.2.
- [6] "OpenStreetMap." Accessed: Nov. 5, 2024. [Online]. Available: <https://www.openstreetmap.org/#map=5/51.50/-0.10>
- [7] C. Corbane, A. Florczyk, M. Pesaresi, P. Politis, and V. Syrris, "GHS-BUILT R2018A - GHS built-up grid, derived from Landsat, multitemporal (1975-1990-2000-2014)," 2018. doi: 10.2905/jrc-ghsl-10007.
- [8] Microsoft Bing, "Global ML Building Footprints." Accessed: Nov. 5, 2024. [Online]. Available: <https://github.com/microsoft/GlobalMLBuildingFootprints?tab=readme-ov-file>
- [9] D. D. Polsby et al., "The Third Criterion: Compactness as a Procedural Safeguard Against Partisan Gerrymandering," in *Yale Law & Policy Review*, vol. 9:301, 1991, pp. 301–353.
- [10] "Sentinel-2 | Copernicus Data Space Ecosystem." Accessed: Nov. 5, 2024. [Online]. Available: <https://dataspace.copernicus.eu/explore-data/data-collections/sentinel-data/sentinel-2>
- [11] NASA, "Earthdata." Accessed: Nov. 5, 2024. [Online]. Available: <https://search.earthdata.nasa.gov/search>

El patrimonio sismológico en el Observatorio Fabra (Barcelona)

Seismic heritage in Fabra Observatory (Barcelona)

MERINO, M.T.⁽¹⁾; BATLLÓ, Josep⁽²⁾

⁽¹⁾ Observatorio Fabra (RACAB), Barcelona, España

⁽²⁾ Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC), Barcelona, España

Autor correspondiente: maite@observatori-fabra.cat

SUMMARY

Fabra Observatory has been operating in Barcelona since 1904. It was created by the Royal Academy of Science and Arts of Barcelona (RACAB), a scientific association established in 1764. The Observatory has always been devoted to astronomical, meteorological and seismological observations and studies.

Seismic observations started in 1906 and have been maintained active since then. They include instrumental records and macroseismic data collected from a number of sources, mainly from Eastern Spain. Its historical archive includes seismograms and complementary documentation such as manuscript and printed bulletins, registers and station notebooks, scientific and divulgation articles in journals and periodicals, letters and scientific correspondence, printed publications from many other institutions, etc. Almost all instruments from that time, are preserved in its small museum or still being used for different purposes.

Fabra Observatory is still an active institution with the main goal of working on interesting contributions to the scientific community. Thanks to the inestimable advice, help and support from other institutions (especially ICGC) and particulars we have also been able to perform diverse projects on our seismic heritage: partial inventories, restorations, studies and scanning. Besides, the observatory has divulgation as another main goal: it has a small museum of instruments, holds regular courses, conferences, scholar visits, and many other occasional activities. We are proud of maintaining our long tradition of being willing to share and collaborate in both scientific and divulgation ways with other investigators, institutions, individuals and groups as much as possible.

In this presentation we review the present status of our seismic heritage, along with some of the projects to recover, preserve and promote it. This contribution is an example of doable activities and projects that a small independent observatory can undergo related to seismic heritage, even with severe limitations of resources and personnel.

PALABRAS CLAVE

Estación sísmica, Observatorio, Sismología, Patrimonio, Instrumentos antiguos, Sismogramas analógicos.

INTRODUCCIÓN

El *Observatorio Fabra* ha funcionado ininterrumpidamente en Barcelona desde 1904. Desde sus orígenes se enfocó en las áreas de Astronomía, Meteorología y Sismología. Como parte de la *Real Academia de Ciencias y Artes de Barcelona* (RACAB), desde sus orígenes es una institución pequeña con recursos económicos y de personal muy limitados, pero con una actividad incesante y un interesante patrimonio científico.

Durante los ciento veinte años transcurridos desde su inauguración, en el *Observatorio Fabra* se han sucedido muchos cambios y reorganizaciones que han afectado a las estancias, instrumentos, registros y documentos, que se acumularon y trasladaron de un sitio a otro por el poco personal existente con la mejor de las voluntades, pero con una falta evidente de recursos, espacios y conocimientos que dieron lugar a un cierto desorden, aún en vías de solución.

Aún no existe un orden, inventario ni catálogo riguroso completo del material y documentación que se ha conservado. Pero sí que de forma lenta pero progresiva y constante, en buena parte gracias a la colaboración y soporte de otras instituciones, entre las que es destacable el *Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya* (ICGC), se han realizado e iniciado numerosos proyectos que han permitido avanzar significativamente en la recuperación de datos y materiales, así como profundizar en otros conocimientos. Se han dedicado muchos recursos a recuperar, preservar, explotar y compartir dicho patrimonio sísmico con la doble finalidad de aportar contribuciones significativas a la comunidad científica y de hacer una divulgación adecuada a las diferentes tipologías de público e investigadores interesados.

El patrimonio acumulado en la *Sección de Sismología del Observatorio Fabra* incluye instrumentos, registros, datos propios y externos, estudios diversos y fondos documentales. No pretendemos hacer aquí una exposición detallada y exhaustiva de un

conjunto tan heterogéneo y diverso que en muchos casos se ha explicado en otras publicaciones que se pueden hallar en la bibliografía incluida al final de este documento. El objetivo aquí es exponer una síntesis que sitúe en contexto la situación actual de la *Sección de Sismología* con un resumen de los contenidos y proyectos más importantes y actualizada hasta el momento presente para facilitar un primer contacto global a los posibles lectores interesados en el patrimonio y/o los proyectos mencionados.

Con este objetivo presentamos muy brevemente la historia de la *Sección de Sismología del Observatorio Fabra* (sección I), su patrimonio instrumental y documental, así como los principales proyectos relacionados realizados o en curso (sección II) y un resumen de la situación actual con algunas consideraciones finales sobre el cómo y el porqué de dichos trabajos (sección III).

I. HISTORIA DE LA SECCIÓN DE SISMOLOGÍA

Existen diversas descripciones y estudios al respecto publicados hasta la primera década de este siglo en curso (Batlló et al., 2006a; Codina, 2008; Comas, 1907; Comas, 1929; Febrer, 1965; Masgrau, 1906; Montaner, 1906 y Susagna et al., 1997). Todos estos trabajos fueron tan completos y rigurosos como la información disponible y conocida en el momento de su redacción permitió. Pero desgraciadamente no siempre fue la misma. En concreto, a partir del inicio de las restauraciones de algunas piezas instrumentales conservadas a partir del cambio de siglo, diversas exposiciones propias y participaciones en otras externas y congresos se fueron desarrollando nuevos estudios y publicaciones de diversa extensión y detalle por parte del personal del Observatorio Fabra y otros colaboradores que aún mantienen mayoritariamente su vigencia (Batlló, 2004; Batlló et al., 2006a; Batlló et al., 2006b; Codina, 2008 y González et al., 2000). Posteriormente, se siguieron realizando diversas revisiones, inventarios y trabajos adicionales de ámbitos más concretos, pero mucho más exhaustivos que han permitido corroborar mucha de la información previa pero también ampliar los conocimientos al respecto, así como en algunos casos desmentir algunas suposiciones previas concretas.

La finalidad prioritaria de un observatorio es realizar observaciones tan exhaustivas, rigurosas y útiles como sea posible según los recursos, conocimientos y objetivos científicos del momento. No sólo para proyectos científicos concretos y limitados en el tiempo y/o objetivos, sino que de la forma lo más homogénea, consistente, redundante y permanente en el tiempo como sea posible, generar series de datos de referencia. Por eso, a modo de contexto apropiado para las explicaciones de posteriores apartados, podemos dividir la historia de la Sección de Sismología en partes o etapas basadas en tipos de observaciones realizadas:

1. Antecedentes y orígenes de la Sección de Sismología del Observatorio Fabra (hasta 1906).
2. Primera Estación Sísmica operativa desde 1906 y desmantelada en 1913.
3. Segunda Estación Sísmica operativa con nuevos sismógrafos mecánicos en papel ahumado (operativa de 1914 hasta 1998).
4. Tercera época instrumental, con sismógrafos electromagnéticos en papel fotográfico y/o tinta (desde 1964).
5. Cuarta época instrumental, con instrumentos y registros digitales o digitalizados (siglo XXI).

A pesar de mantener un cierto orden cronológico, son etapas que en muchos casos solapan en el tiempo. Se puede hallar una pequeña ampliación de la descripción de cada etapa y su patrimonio conservado respectivamente en los apartados II.1, II.2, II.3, II.4 y II.5 de este trabajo.

En la *Sección de Sismología del Observatorio Fabra* se han procesado y analizado todos los datos recogidos y otros provenientes de fuentes externas (de otras estaciones, observatorios, instituciones y particulares de todo el mundo). Los registros sísmicos obtenidos con la instrumentación disponible de cada época se estudiaban y analizaban apropiadamente para elaborar boletines y catálogos de detecciones e identificaciones de terremotos (y en algunos casos otros fenómenos sísmicos) que posteriormente se publicaban para su difusión, además de otros estudios con diversos formatos y finalidades. Desde sus inicios el *Observatorio Fabra* ha compartido y publicado sus datos y análisis, ha colaborado y ha facilitado muchos trabajos externos con el objetivo de contribuir al avance de la ciencia en la medida de sus posibilidades. Su personal y otros colaboradores más o menos cercanos han realizado, hecho posible y apoyado diversos trabajos, estudios y contribuciones a la comunidad científica.

Por último, pero no menos importante, el *Observatorio Fabra* siempre ha mantenido una importante misión de divulgación

dirigida a la sociedad, articulada principalmente vía visitas, conferencias, cursos y publicaciones puntuales dirigidas tanto a escolares como al público general.

II. PATRIMONIO CONSERVADO

En el *Observatorio Fabra* y en la *RACAB* se ha conservado la inmensa mayoría del patrimonio generado, recibido y relacionado con la *Sección de Sismología* desde sus inicios, así como bastante documentación relativa a sus orígenes y otras instituciones. Durante lo que llevamos de siglo XXI principalmente se ha trabajado de forma progresiva en la identificación, revisión, clasificación, conservación y estudio detallado de diferentes elementos del patrimonio instrumental y documental conservado. Y en aquellos casos que se han detectado signos de deterioro en alguna colección se han realizado los esfuerzos necesarios para mejorar su estado de preservación de la forma más adecuada posible dentro de las limitadas posibilidades existentes. Aunque no se ha finalizado un catálogo exhaustivo completo, a medida que dichos trabajos progresaban se han ido presentando resúmenes cada vez más detallados y precisos en diversos foros nacionales e internacionales y aumenta la documentación disponible para consulta pública online a través de la web que ICGC mantiene con fondos disponibles del *Observatorio Fabra* (ICGC, 2024) o por petición expresa. Actualmente se está trabajando para que estén a disposición los resultados de dichos trabajos con una base de datos más apropiada y versátil para manejar el cada vez mayor volumen de datos generados de forma óptima y así facilitar las búsquedas y estudios especializados al respecto. Todas estas actuaciones se han realizado en gran parte gracias a la colaboración y apoyo más o menos puntual de otras instituciones, entre las que destacan: ICGC, INGV, diversos departamentos de la Generalidad de Cataluña, el Ayuntamiento de Barcelona, la Diputación de Barcelona, el CSIC y el CRAI-UB.

A continuación, presentamos una simple enumeración de elementos del patrimonio y una breve relación de éstos con las respectivas etapas de la *Sección de Sismología* para dar una idea de su contenido y así entender mejor la magnitud y la situación actual de las actuaciones realizadas, en curso o previstas.

La parte instrumental comprende casi la totalidad de los aparatos, accesorios y herramientas utilizadas para las observaciones y el análisis. La parte documental principalmente comprende: registros sísmicos (sismogramas); material de producción propia como archivos de diversa documentación interna o proyectos más o menos particulares; memorias o boletines publicados; bibliografía y datos externos publicados proveniente de fondos particulares y externos de múltiples instituciones principalmente vía intercambio bibliotecario; cuadernos manuscritos originales; diagramas, mapas, fotografías y otros materiales gráficos accesorios; cartas y comunicaciones con otros particulares e instituciones.

Se ha organizado un archivo de sismogramas donde se conservan apropiadamente archivados y ordenados los registros originales, no sólo para asegurar una mejor conservación y preservación, sino también para facilitar su consulta y uso. Los instrumentos y otros elementos históricos relacionados se han identificado, en algunos casos restaurado y también exhibido en diferentes áreas del observatorio, destacando los actualmente visibles en el museo del observatorio y los aún mantenidos en la sala de sismógrafos.

En los siguientes subapartados se resume el patrimonio acumulado conservado más significativo de las respectivas etapas de la Sección de Sismología enumeradas anteriormente en sección I, así como los principales proyectos relacionados.

II.1 Antecedentes y orígenes de la Sección de Sismología (hasta 1906)

Su origen está directamente relacionado con la creación del observatorio de la *RACAB* en su sede central (a pesar de que finalmente no contó con ningún aparato sísmico), con el proyecto inicial del observatorio en la cima del Tibidabo presentado en 1895 (que no llegó a realizarse), y con la posterior creación del *Observatorio Fabra* en sus terrenos actuales, brevemente explicado en (Codina, 2008 y Febrer, 1965).

La documentación sobre la instrumentación comienza con su elección y compra a partir de 1902, cuando Josep Comas ya ha sido nombrado director de la sección de astronomía y director interino de la sección de meteorología (que contenía la sismología como meteorología endógena) del *Observatorio Fabra*, aún en construcción. La *Sección de Sismología* existe desde la inauguración del observatorio en 1904, pero los instrumentos no llegarían hasta 1905, consiguiendo estar plenamente operativa la primera estación sísmica a partir de 1906.

De esta etapa se conserva mucha documentación propia relativa a los proyectos realizados, e incluso de las pugnas por su autoría dentro de la rivalidad manifiesta durante décadas entre Eduard Fontserè (Iglésies, 1983; Roca et al., 2004) i Josep Comas (Carsi et

al., 1937; Roca,2005). Incluye actas, memorias, artículos, mapas, presupuestos, facturas, cartas personales e institucionales, etc. Algunos documentos están identificados y catalogados como parte del fondo de la *Biblioteca de RACAB*, pero muchos están en el archivo del *Observatorio Fabra*, del que aún no hay un catálogo detallado realizado.

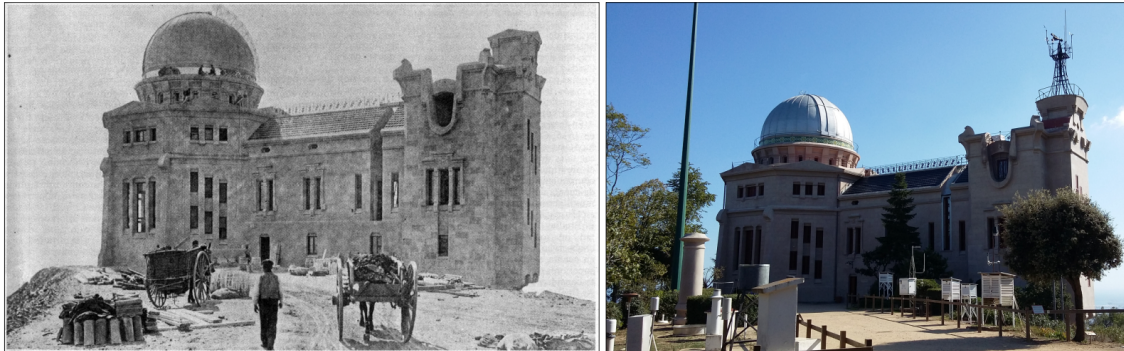


Figura 1: Observatorio Fabra durante su construcción (izquierda) y actualmente (derecha).

II.2 Primera Estación Sísmica (1906-1913)

La primera estación sísmica del *Observatorio Fabra*, bajo la dirección de J. Comas y con registros desde 1906 hasta 1913, fue una de las primeras del estado. Durante este período se realizaron, entre otros, resúmenes semanales de las detecciones con divulgación a la prensa, los primeros estudios isosísticos desde 1907, el primer mapa de sismicidad de Cataluña correspondiente al período 1906-1910 y diversas publicaciones y estudios sobre sismología teórica, observacional e instrumental.

Originalmente se compró e instaló un sismoscopio de Agamennone con un reloj avisador, un microsismógrafo Vicentini de tres componentes en papel ahumado, un sismógrafo de Cancani de dos componentes horizontales en papel ahumado y un sismógrafo de Agamennone de dos componentes horizontales en papel y tinta. Entre el inicio oficial de la estación en 1906 y su parada en 1913 ocurrieron múltiples cambios de configuración, funcionamiento y denominación de los instrumentos. El local en el que se procedió a su instalación es el mismo donde se han instalado los diferentes sismómetros hasta la actualidad (la sala de sismógrafos) pero ha sufrido importantes reformas posteriores. Se conservan casi todas las partes de estos instrumentos, habiendo procedido a restaurar y exponer su mayoría con diferentes finalidades. Se ha procedido también a la restauración, inventario detallado, fotografías y archivo apropiado del millar aproximado de registros sísmicos (sismogramas) que aún se conservan de este período y que habían comenzado a mostrar signos de deterioro importante.

La documentación adicional existente conservada, aparte de las publicaciones y registros oficiales ya mencionados, es relativamente poca y muy dispersa, principalmente a causa del cambio de director de la *Sección de Sismología* en 1913 y de la muerte repentina en 1937 de J. Comas con la posterior pérdida de la mayoría de su fondo documental. Gracias a la colaboración y ayuda de algunas instituciones, entre ellas ICGC, se han realizado diversos proyectos que han permitido profundizar en la recuperación de datos, materiales y otros conocimientos de dicha época, así como de fotografiar, digitalizar y estudiar gran parte de lo conservado. Destacan algunas fotografías, correspondencia, las fichas de los resúmenes semanales y artículos publicados en la prensa general contemporánea. También se encuentran referencias frecuentes a los instrumentos y sus registros en la *Revista de la Sociedad Astronómica de España y América* (SADEYA) de la que J. Comas fue fundador y director honorario.

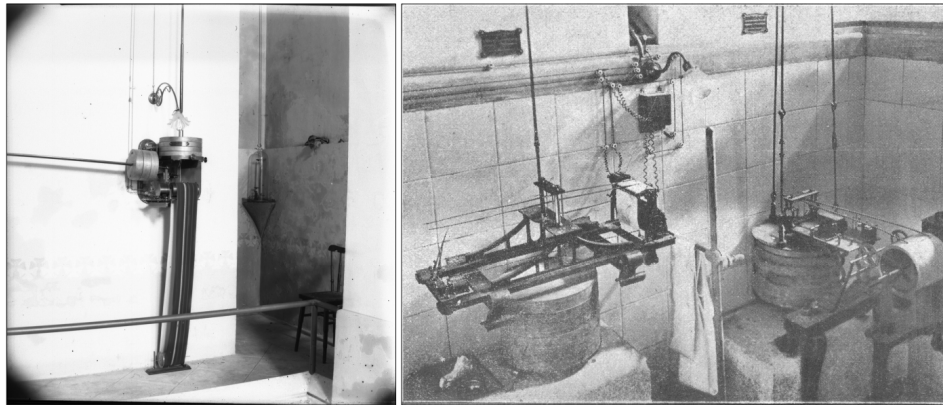


Figura 2: Instrumentos de la primera estación sísmica. Izquierda: sismógrafo Vicentini y sismoscopio Agamennone (fuente: archivo Observatorio Sant Julià de Vilatorta). Derecha: sismógrafos horizontales Agamennone y Cancani (Muntaner, 1906).

II.3 Segunda Estación Sísmica (1906-1998)

En 1913, el nuevo director de la Sección de Sismología, Eduard Fontserè, desmanteló la primera estación sísmica y acondicionó con importantes reformas la sala de sismógrafos para montar una nueva estación significativamente diferente que comenzó a ser operativa en 1914. Retiró definitivamente los sismógrafos previos de dos componentes e instaló en su lugar dos nuevos sismógrafos horizontales Mainka. En cambio, hizo modificar y reinstalar el sismógrafo Vicentini que funcionaba desde 1906. Dichos sismógrafos Mainka y Vicentini se encuentran aún en la misma posición y se han restaurado para poder volver a utilizarlos puntualmente con papel ahumado como antes, pero también digitalizados y al lado de los instrumentos más modernos. De esta manera, si se consiguen los recursos necesarios, se podría comparar y estudiar experimentalmente sus respectivos registros y modelar experimentalmente las conversiones adecuadas para hacer análisis comparativos de sismogramas de diferentes épocas.

Se conservan unos veinte mil sismogramas de estos instrumentos, la mayoría de los cuales han sido ya revisados e inventariados. De éstos, aproximadamente dos mil se han digitalizado con escáneres especializados en la sede de Roma del *Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia* (INGV) y, gracias a la ayuda y colaboración de ICGC y CSIC, cerca de dieciocho mil más por la empresa especializada *Ad Hoc* en Barcelona.

En este periodo se definieron e implantaron protocolos metódicos (en consonancia a los criterios que se iban imponiendo en otros observatorios similares) para las observaciones y el análisis rutinario de los datos resultantes. Gracias a la ayuda de las instituciones ya mencionadas, a lo largo de múltiples proyectos se ha podido escanear la casi totalidad de los documentos relativos a la obtención y análisis contemporáneo de los sismogramas de esta segunda estación sísmica, así como los compendios de los resultados publicados, libros de observaciones, registros del estado y reparaciones del instrumental, boletines, etc.

También se amplió e intensificó la comunicación y colaboración con muchos otros observatorios, instituciones y particulares de todo el mundo (Batlló, 2009). Del intercambio de datos y publicaciones se conserva un fondo muy diverso que consta de telegramas, cartas, fotografías, manuales, bibliografía, etc. Destaca también la recopilación meticulosa y estudio de datos macrosísmicos de los sismos detectados desde 1904 hasta la inauguración del *Institut Cartogràfic de Catalunya* (ICC) en 1984 (institución heredera de dicha responsabilidad) que consiste en la recopilación de datos que instituciones y particulares enviaban para comunicar su percepción y los efectos de los terremotos más cercanos, así como los estudios isosísmicos correspondientes realizados por el personal de la sección de sismica. Esta extensa tarea llegó a contar con la colaboración de una red de observadores sísmicos extendidos por Cataluña y regiones cercanas que dieron lugar a muchos estudios isosísmicos y una colección de cerca de diez mil documentos relacionados que incluyen telegramas, informes oficiales, cartas de particulares, prensa, etc. Se complementa con un extenso trabajo sobre terremotos anteriores realizado por E. Fontserè y publicado por I. Iglésies en forma de libro (Fontserè y Iglésies, 1971) que incluye los terremotos detectados en tierras catalanas desde 1100 hasta 1906. Gran parte de toda esta documentación y correspondencia se ha preservado, pero aún no se ha podido inventariar ni catalogar apropiadamente. En su mayoría ya ha sido digitalizada, aunque aún no se ha podido poner a disposición del público online por tener que estudiar con más detalle la mejor forma de hacerlo sin incurrir en incompatibilidades legales con los diversos derechos de autor o privacidad de datos personales.

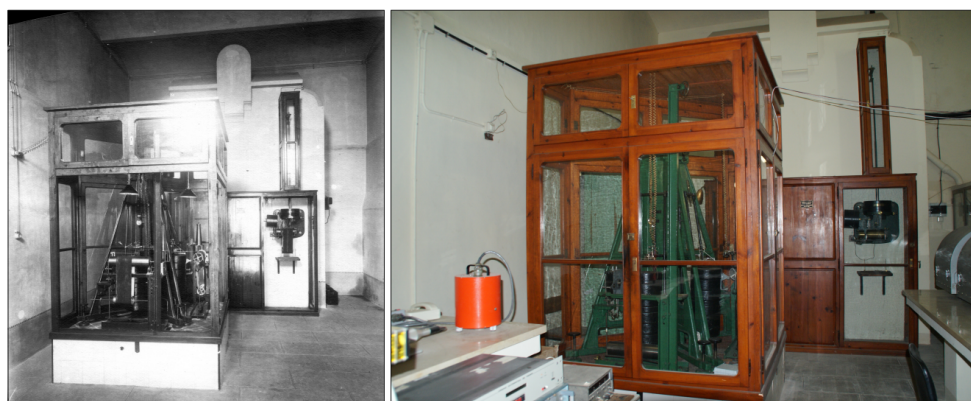


Figura 3: Segunda estación sísmica del Observatorio Fabra poco después de su inauguración en 2014 (izquierda) y en 2010 (derecha).

II.4 Tercera época instrumental (desde 1964)

A inicios de la década de los años 60 se añadió un nuevo pilar en la sala de sismógrafos para albergar los nuevos sensores electromecánicos Hiller-Stuttgart con registradores en papel fotográfico, que fueron oficialmente inaugurados en 1964. Se conservan sus sismogramas en papel fotográfico (y en papel y tinta en aquellos periodos en que un registrador Lennartz sustituyó a los registradores fotográficos por averías) hasta su retirada en 1989. Unos pocos se digitalizaron dentro del proyecto EUROSEISMOS (Tarabusi et al., 2006) y la totalidad de la serie se inventarió y digitalizó completamente gracias a diversos proyectos posteriores. Gran parte de dichas digitalizaciones se encuentran a disposición a partir de la web (ICGC, 2024).

Des de 1983 también han funcionado tres sensores Geotech S13 situados en una segunda estación sísmica mucho menos ruidosa en la finca de Fontmartina (a unos 50 km, en el *Parque y Reserva de la Biosfera del Montseny*), gracias a la colaboración y ayuda de la Diputación de Barcelona, que es una de las entidades responsables de dicho parque natural. Sus datos se enviaban por radio y posteriormente vía satélite hasta el Observatorio Fabra, donde se procesan y registran en bandas de papel y tinta.

También se dispone desde 1990 y aún operativos en la sala de sismógrafos del Observatorio Fabra de tres sensores de corto periodo Mark-L4 que registran en papel y tinta con el mismo registrador Lennartz que anteriormente se utilizó como sustitución temporal del papel fotográfico de los Hiller-Stuttgart.

De esta época se conserva la documentación relativa a las observaciones y análisis de los datos obtenidos, los registros y documentación relativa a los instrumentos operativos en la estación sísmica del Observatorio Fabra. Una vez los registros de papel fotográfico ya habían cesado y el centenario del Observatorio Fabra se acercaba, se realizaron trabajos adicionales de revisión de datos, registros e instrumental acumulados. Dentro de la colaboración mantenida con el ICC, dichos datos contribuyeron significativamente al *Atlas Sísmic de Catalunya* (Susagna y Goula, 1999). Inscrita en la colaboración mantenida con INGV se participó activamente en la iniciativa TROMOS, de identificación de patrimonio sísmico, y algunos registros se escanearon y contribuyeron a la iniciativa internacional EUROSEISMOS. En ese contexto, se inició una detallada revisión del patrimonio instrumental guardado (Batlló, 2004; Susagna et al., 1997) que permitió iniciar las primeras restauraciones de algunas piezas (Batlló et al., 2006b).

Toda esta instrumentación coincidió durante bastantes años con los instrumentos mecánicos operando sobre papel ahumado descritos en el subapartado anterior II.3. Los registros y documentación generados en la estación sísmica del Observatorio Fabra se han digitalizado en su mayoría gracias a diversos proyectos con ayuda del ICGC, diversos departamentos de la Generalitat de Catalunya y del Ayuntamiento de Barcelona. Actualmente se trabaja para hacerlos más fácilmente accesibles vía un sistema informático viable que gestione adecuadamente las búsquedas entre las decenas de Terabytes generados y de forma coherente con el resto del archivo digital del *Observatorio Fabra*. Respecto a los registros de la estación sísmica de Fontmartina, gracias a la colaboración y ayuda de la Diputación de Barcelona, se ha podido reorganizar, revisar e inventariar detalladamente, pero aún no se han podido digitalizar hasta la fecha.

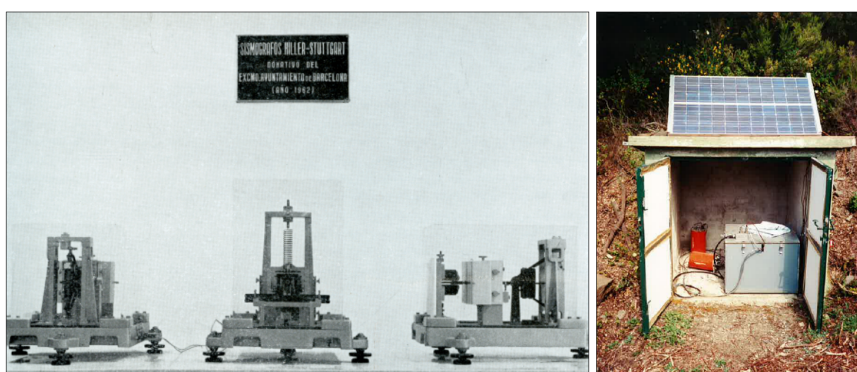


Figura 4: Izquierda: sensores Hiller-Stuttgart en 1964. Derecha: estación sísmica en Fontmartina en 1988.

II.4 Cuarta época instrumental (s.XXI)

En 1995 se introdujo en la *estación sísmica del Observatorio Fabra* un acelerómetro digital triaxial Kinemetrix SSA-2 de la red del *Instituto Geográfico Nacional (IGN)* operado por el ICC. En 2003 se añadió un sismógrafo triaxial de banda ancha Geotech KS2000 con digitalizador de 24 bits del *Laboratori d'Estudis Geofísics Eduard Fontserè (LEGEF)* que producía también datos directamente en formato digital. Tras el centenario del *Observatorio Fabra*, se pasó progresivamente a modernizar los sistemas informáticos y a experimentar con la captación de datos sísmicos digitales. Inicialmente se utilizaron digitalizadores de producción propia para la señal que llegaba por radio desde Fontmartina, para un transductor que medía con precisión el movimiento de un péndulo del sismógrafo mecánico Mainka y para un sismógrafo educativo capacitivo que se instaló en el museo. El acelerómetro se sustituyó en 2012 por otro triaxial de Güralp más moderno perteneciente a la red de acelerómetros del *Instituto Geológico de Cataluña (IGC)*, institución heredera del ICC y que después pasó a formar parte del ICGC. Y entre los años 2012 y 2022 también funcionó un sismógrafo de banda ancha triaxial Trillium Compact del *Instituto de Ciencias de la Tierra del Centro Superior de Investigaciones Científicas (ICITA-CSIC)*, que pasó a ser posteriormente GEO3BCN-CSIC). Además, se han realizado diversos proyectos de experimentación y desarrollo de sensores y digitalizadores de bajo coste, tanto de producción propia como comerciales, buscando realizar evaluaciones complementarias comparativas con el resto de instrumentación profesional científica y proponer y testear sistemas alternativos para estaciones sísmicas de bajo coste con finalidades temporales, educativas o de divulgación.

De forma paralela, en 1999 el ICC transformó la *estación sísmica de Fontmartina* en una de las primeras estaciones digitales de banda ancha de Cataluña, dotándola de un pozo sísmico mucho más apropiado para los sensibles sismógrafos de banda ancha en los que se basaría la nueva red oficial (Butlletí, 1999). Se trasladaron al pozo los tres sensores pre-existentes de corto período Geotech S13 y un nuevo sismógrafo de banda ancha Güralp CMG40T, dejando la caseta previa reservada para los sistemas de baterías de emergencia, comunicaciones, preamplificador, digitalizadores y emisores de los respectivos sistemas (se dotó la estación de conexión por satélite). En 2008 se sustituyó el sensor de banda ancha por otro modelo CMG3T, que en 2012 se sustituyó por una versión más moderna del mismo modelo. Desde entonces la estación de Fontmartina se ha ido renovando en instrumental e instalaciones para mantenerla con un funcionamiento óptimo como estación oficial remota y autónoma con conexión casi-real a los organismos pertinentes. También se ha utilizado y se utiliza como base de pruebas para los distintos proyectos de comparativas y desarrollo instrumental por tener una localización idónea y un nivel de ruido mucho menor que la estación sísmica del Observatorio Fabra.

Se aprovecho la preparación del 250 aniversario de RACAB en 2014 para iniciar la reordenación, mejora del estado de preservación, acceso, visibilidad y uso del patrimonio acumulado hasta el momento en las dependencias de la *Sección de Sismología* en el *Observatorio Fabra* y en la RACAB gracias a diversos proyectos realizados con el soporte del ICGC, *Ayuntamiento de Barcelona*, departamentos de la Generalidad de Cataluña y la Diputación de Barcelona. Se planificó e implementó un nuevo archivo de sismogramas en dependencias rehabilitadas a tal efecto en base a los resultados de un estudio previo sobre el estado y posibles mejoras en la preservación de los sismogramas realizado progresivamente gracias a la colaboración con el *Taller de Restauración de la Facultad de Bellas Artes de la Universidad de Barcelona* y el *Taller de Restauración del CRAI de la Biblioteca de la Universidad de Barcelona* (Andrades, 2014). Se prepararon y trasladaron los sismogramas analógicos históricos desde las dependencias de la RACAB hasta el nuevo archivo en el *Observatorio Fabra* y desde entonces progresivamente se han revisado, reordenado, inventariado, escaneado y recolocado apropiadamente. Asimismo, se han desarrollado proyectos para avanzar en el estudio, recuperación, restauración y exhibición del patrimonio instrumental. Por último, se han realizado o iniciado diversos

trabajos para la revisión, digitalización y en breve el futuro traslado del resto de documentación aún en RACAB a las dependencias del Observatorio Fabra.

Actualmente ya se ha realizado el inventario completo de sismogramas desde 1906 hasta 1992, y se está trabajando para alargarlo hasta el año 2000 durante 2024. Dicho inventario exhaustivo se correlaciona con la información complementaria y otros catálogos de referencia según la época. También se está trabajando en un inventario complementario de las fases detectadas de terremotos reportados, elaborado hasta el momento para el período 1973-1992 y aún en curso de ir ampliándolo progresivamente.

A medida que dichos trabajos progresan se han presentado resúmenes cada vez más detallados y precisos en diversos foros nacionales e internacionales y se ha ido aumentando la documentación disponible para consulta pública online a través de la web que ICGC mantiene con fondos disponibles del *Observatorio Fabra* (ICGC, 2024) o por petición expresa. Como ya se mencionó, esperamos optimizar el acceso a esta información en breve.

Toda la experiencia acumulada en estos años se ha utilizado para la elaboración del Tutorial de Preservación de Patrimonio Sísmico para ser presentado por el grupo de trabajo del European Seismological Commission (ESC) WG 02-12 "Preservation, valorisation and analysis of seismological legacy data" como guía de referencia (Tutorial, 2024).

Por otra parte, durante el s. XXI se ha aumentado enormemente las actividades educativas y divulgativas del Observatorio Fabra, siendo de muy diversa índole y público asistente. Se realizan multitud de visitas, actos, cursos y conferencias que involucran a miles de asistentes anualmente. La Sección de Sismología ha ido incrementando de forma paralela su contribución a los espacios y recursos visitables, así como a dichas actividades. Destacan entre ellas las actividades de divulgación conjuntas por parte de ICGC y RACAB dirigidas al público general durante la Semana de la Ciencia de Barcelona desde el Observatorio Fabra (desde 2018) y desde Fontmartina (desde 2019) durante las que se intenta difundir la sismología desde un punto de vista tanto teórico como experimental para diferentes sectores de la población.

III. RESUMEN Y CONCLUSIONES

En los apartados anteriores se ha presentado brevemente el origen, la tipología y la situación actual del patrimonio de la Sección de Sismología del Observatorio Fabra, así como los trabajos al respecto realizados o en curso. En resumen:

- La Sección de Sismología del Observatorio Fabra funciona desde el año 1904 y conserva observaciones originales insustituibles de múltiples instrumentos, estudios y colaboraciones que han ido ampliándose de forma acorde a cada época desde 1906.
- Pese a ser una institución modesta con recursos muy limitados, gracias a las múltiples colaboraciones y ayudas que recibe la RACAB de otras instituciones y particulares ha podido desde su inicio adquirir y mantener series de datos muy diversos y participar en una gran multiplicidad de proyectos de muy diversa índole.
- Su situación privilegiada dentro de la ciudad del Barcelona y a lo largo de ciento veinte años la convierte en una referencia para el seguimiento y la evaluación de la actividad y peligrosidad sísmica en el área metropolitana, destacando especialmente en el seguimiento de la microsismicidad local y regional, y los estudios históricos de la sismología desde inicios del s. XX.
- Desde 1983 cuenta con una segunda estación sísmica situada en Fontmartina a unos 50 km de distancia, dentro del Parque Natural y Reserva de la Biosfera del Montseny, que le posibilita operar de forma complementaria, remota y autónoma instrumentos complementarios desde una ubicación con mucho menor ruido sísmico.
- Se conservan la inmensa mayoría de los datos, documentos, instrumentos y accesorios utilizados desde su inicio, así como un importante volumen de documentación proveniente de terceros.
- Se intenta mantener operativos todos los instrumentos de forma paralela y complementaria junto con los más modernos, y para todos los que ya no es posible se han estudiado, restaurado y/o expuesto convenientemente.
- Se han revisado, inventariado, restaurado, reordenado, fotografiado o escaneado la mayoría de los sismogramas analógicos conservados, y siguen en curso los trabajos para completar esta importante labor.

- Se está revisando, digitalizando y estudiando la documentación adicional y complementaria a las observaciones, así como observaciones macrosísmicas, publicaciones, bibliografía, correspondencia, etc., para avanzar en el reanálisis de los datos pasados con los conocimientos actuales.
- Ha sido organizado un nuevo archivo de sismogramas analógicos y se han adecuado diversos espacios y recursos en el Observatorio Fabra para mejorar la preservación, visibilidad y uso de su patrimonio.
- La exhibición y publicación de los trabajos ha ido aumentando en la medida de las posibilidades existentes. Actualmente se está trabajando en una mejor reorganización y distribución de las decenas de Terabytes acumulados para facilitar su uso y disponibilidad online.
- La divulgación es un objetivo adicional muy importante que se ha realizado desde sus orígenes, pero se ha visto incrementada de forma muy significativa especialmente durante lo que llevamos de siglo XXI.

Consideramos que todo este patrimonio acumulado puede ser útil para generar resultados científicos mediante el reanálisis de datos pasados con los conocimientos actuales, además de para otros usos como, por ejemplo, estudios históricos o divulgación de la sismología o la resiliencia ante riesgos sísmicos. Pero para ello, como material inédito e insustituible que es, debe ser recuperado, mantenido, explorado, valorado, utilizado y explicado adecuadamente. Con los recursos limitados de una institución pequeña y modesta como es el *Observatorio Fabra* de la RACAB, gracias al apoyo y ayuda de diversas instituciones y particulares, hemos podido realizar múltiples estudios y actuaciones con vistas a avanzar significativamente en estos objetivos tan deseados. Deseamos que todos estos esfuerzos garanticen la conservación y uso de todo este patrimonio por mucho más tiempo y puedan extraerse conocimientos y resultados útiles y valiosos para todos aquellos interesados.

También nos gustaría poder aportar con estos ejemplos ideas y modelos que sirvan a otras instituciones para reconocer, conservar y utilizar su respectivo patrimonio acumulado. Creemos firmemente que hay muchos proyectos factibles con recursos muy limitados, que la colaboración es la clave para afrontar los retos y que el apoyo y motivación de los implicados pueden resultar más importantes y difíciles de conseguir que incluso el dinero.

REFERENCIAS

- [1] Andrades, T. (2014): "Estudio sobre la conservación de las bandas sismográficas ahumadas del Observatorio Fabra". La Recerca en Conservació des de la Visió del Conservador-Restaurador II, 57-65. <http://hdl.handle.net/2445/60511>
- [2] Batlló, J. (2004): Catálogo inventario de sismógrafos antiguos españoles. Instituto Geográfico Nacional, Madrid.
- [3] Batlló, J., T. Susagna y J. M. Codina (2006a): "Cent anys de l'Observatori Fabra". Actes de les VIII Trobades d'Història de la Ciència i de la Tècnica, 249-253.
- [4] Batlló, J., C. Clemente, F. Pérez-Blanco and T. Susagna (2006b): "La restauració dels antics sismògrafs de l'Observatori Fabra". Actes de les VIII Trobades d'Història de la Ciència i de la Tècnica, 329-336.
- [5] Batlló, J. (2009): "Scientists and scientific associations in Catalonia (Spain) in the early 20th century: manuscript vs. published research in earth sciences". Annals of Geophysics, 52 (6), 573-582.
- [6] Butlletí (1999): Butlletí Sismològic. Institut Cartogràfic de Catalunya, Barcelona.
- [7] Carsi, A., J. Febrer y B. Pou (1937): "José Comas Solá". Oficinas de propaganda C.N.T.-F.A.I.-J.J.LL., Barcelona.
- [8] Codina, J.M. (2008): "Centè aniversari de la fundació de l'Observatori Fabra" Reial Acadèmia de Ciències i Arts de Barcelona.
- [9] Comas, J. (1907): Astronomía y Ciencia General. F. Granada y C^a Editores, Barcelona.
- [10] Comas, J. (1929): "El Cielo. Novísima Astronomía Ilustrada", Cap. XXIV, Casa Seguí, Barcelona.
- [11] Febrer, J. (1965): "El Observatorio Fabra". Real Academia de Ciencias y Artes de Barcelona.
- [12] Fontserè, E. y E. Iglésies (1971): Recopilació de les dades sísmiques de les Terres Catalanes entre 1100 i 1906. Fundació Salvador

Vives Casajuana, Barcelona.

- [13] Gonzalez, M., T. Susagna y J.M. Codina (2000): "Col·lecció d'instruments científics a l'Observatori Fabra". Actes de les V Trobades d'Història de la Ciència i de la Tècnica, 197-202.
- [14] ICGC (2024): <https://www.icgc.cat/es/Ambitos-tematicos/Serveis-dalerta/Terremotos/Recopilaciones-de-informacion-sismica-y-mapas/Observatorio-Fabra>.
- [15] Iglésies, J. (1983): Eduard Fontserè. relació de fets. Fundació Salvador Vives Casajuana, Barcelona.
- [16] Masgrau, J. (1906): "El Observatorio Fabra". El Mundo Científico, VIII, num. 338, 527-528.
- [17] Montaner (1906): "Barcelona--Instalación sísmica del Observatorio Fabra". La Ilustración Artística: periódico semanal de literatura, artes y ciencias, XXV, num. 1291, 630-631.
- [18] Roca, A., J. Batlló y J. Arús (2004): Biografia del doctor Eduard Fontserè i Riba (1870-1970). ACAM, Barcelona.
- [19] Roca, A. (coord.) (2005): Josep Comas i Solà. Astrònom i divulgador. Ajuntament de Barcelona, Barcelona.
- [20] Susagna, T., J. Batlló y A. Roca (1997): "Seismographs, seismograms and related materials preserved in Catalonia (NE Spain)". Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, 13, 37-48.
- [21] Susagna, T. y X. Goula (1999): Atlas sísmic de Catalunya. Volum 1: Catàleg de sismicitat. Institut Cartogràfic de Catalunya, Barcelona.
- [22] Tarabusi, G., G. Ferrari y M. Caciagli (2006): "Storing and disseminating the information and data of historical instrumental seismology: the TROMOS database and the EUROSEISMOS website". 1st European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Abstract book, 103.
- [23] Tutorial (2024): <https://www.legacy-seismograms.eu/2024/09/23/seismic-patrimony-preservation-tutorial/>

S.03

Geomagnetismo e Aeronomia Geomagnetismo y Aeronomía

Spatial total electron content gradients for Iberian Peninsula and Portuguese and Spanish archipelagos during geomagnetic storms of 2023

MOROZOVA, Anna ^(1,2); BARATA, Teresa ^(1,3)

⁽¹⁾ Instituto de Astrofísica e Ciências do Espaço, University of Coimbra, OGAUC, Coimbra, Portugal

⁽²⁾ Department of Physics, FCTUC, University of Coimbra, Coimbra, Portugal

⁽³⁾ Department of Earth Sciences, FCTUC, University of Coimbra, Coimbra, Portugal

Corresponding author: annamorozovauc@gmail.com

SUMMARY

Safety of civil aviation depends on the quality of GNSS services providing precise positioning during an aircraft landing. In turn, the quality of GNSS signal can be drastically affected by ionospheric disturbances including sharp spatial gradients of electron density. Here we present an analysis of spatial gradients of the total electron content (TEC) for the Iberian Peninsula and Portuguese and Spanish archipelagos (Azores, Madeira, Canary Islands) during three strong geomagnetic storms of 2023. The analysis was performed using TEC gradients calculated both using the global ionospheric maps (GIMs) and data from ground GNSS receivers.

KEYWORDS

Ionosphere, total electron content (TEC), geomagnetic storms, TEC gradients.

INTRODUCTION

CIVIL AVIATION SAFETY AND THREAT MODELS

Aviation is one of the economic sectors that are most vulnerable to space weather effects since it relies more and more on GNSS-based navigation methods. There are systems that help to augment the existing quality of the GNSS positioning: GBAS (Ground Based Augmentation System) and SBAS (Satellite Based Augmentation system). SBAS is a wide area/regional scale system and may be used in all phases of a flight. GBAS is a service confined to a local area (e.g., an airport) and provides enough accuracy for precision landing. GBAS and SBAS use special systems to mitigate the impacts of anomalous ionospheric conditions - Ionospheric Threat Models [1].

GBAS THREAT MODELS

Ionospheric anomalies (e.g., plasma bubbles) might produce a significant error for a GBAS-based positioning, especially during an aircraft approach and landing phases. The rate of change of TEC (total electron content) under the nominal conditions is very small over short distance (~100 km). However, in the presence of ionospheric gradients (changes of the electron density and, consequently, TEC values) the positioning errors can change by tens of meters in a few minutes. An ionospheric threat model consists of defined ranges of possible values of a set of parameters, including spatial and temporal ionospheric gradients, front moving speed, width and the maximum ionospheric delay.

A common practice to establish an ionospheric threat model for a geographic region where the system will be deployed consist of following steps. First it is necessary to find the worst-case gradient (based on studies of observed ionospheric conditions to determine how larger the gradients can be for the that region). Then, one must define a range of values for the gradient parameters that combined could harm GBAS (using software that convert ionospheric parameters to positioning errors). Finally, anomalous distributions of electron density must be simulated according to the front model and the differential range and position errors must be estimated following the integrity requirements by ICAO [1].

One of the biggest problems with this approach is that the threat models are derived based on historical data, thus this approach cannot protect users against a larger gradient that might occur at some point in time in the future. Thus, the historical analysis must be made on as large data base as possible.

In this work we analysed three geomagnetic storms of a comparable strength that took place in 2023 and estimated spatial TEV gradients observed during these storms in the area covering the Iberian Peninsula, and the Azores, Canary and Madeira

Archipelagos (see Fig. 1).

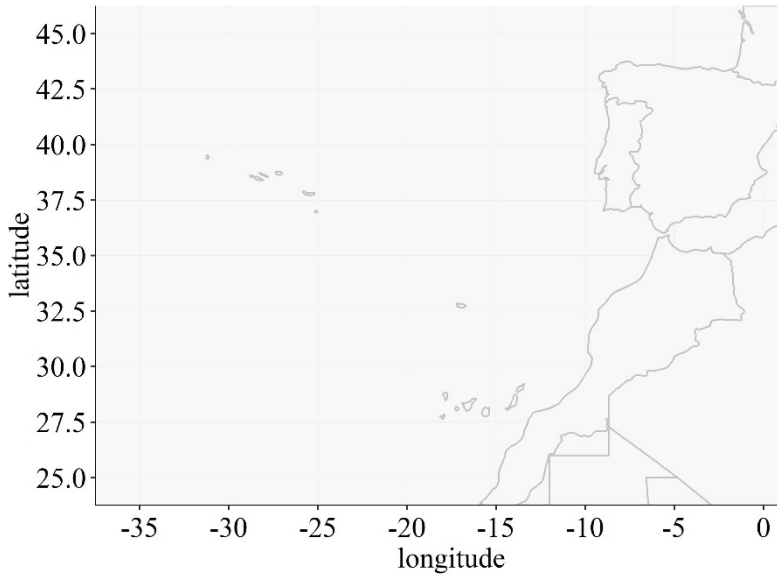


Figure 1: Studied region.

DATA AND METHODS

Spatial TEC gradients (∇TEC) were calculated as differences between TEC values at adjacent locations along the latitude ($\nabla_x \text{TEC}$) and longitude ($\nabla_y \text{TEC}$), and further on to calculate the absolute gradient ∇TEC . Two approaches were used in this work to calculate ∇TEC . Approach A used global ionospheric maps (GIMs) to generate maps of ∇TEC , while Approach B uses TEC data obtained from the RINEX files provided by the Portuguese network of geodetic receivers – RENEP, to calculate gradients for specific locations. The RINEX files were processed using the “GNSS Lab” software.

The gradients obtained during the studied geomagnetic storms were classified using the following thresholds, as defined in [2]:

- Quiet ionosphere: 12-24 mTECu/km
- Dangerous ionospheric storms: 150-200 mTECu/km
- Threat model boundary for a safe landing: 250-860 mTECu/km

IONOSPHERIC GRADIENTS - APPROACH A: CALCULATION OF ∇TEC USING GIMS

This approach was developed by [3]: spatial TEC gradients (see Fig. 2) are calculated as differences between TEC values at adjacent grid points (i,j) at the same latitude ($\nabla_x \text{TEC}$ or $\nabla_{x,ij}$ in Eq. 1) or longitude ($\nabla_y \text{TEC}$ or $\nabla_{y,ij}$ in Eq. 2), which are then used to determine the absolute gradient (∇TEC or ∇_{ij} in Eq. 3):

$$\nabla_{x,ij} = (\text{TEC}_{ij} - \text{TEC}_{i-1,j})/\Delta \text{Lon} \quad (1)$$

$$\nabla_{y,ij} = (\text{TEC}_{ij} - \text{TEC}_{i,j-1})/\Delta \text{Lat} \quad (2)$$

$$\nabla_{ij}^2 = \nabla_{x,ij}^2 + \nabla_{y,ij}^2, \quad (3)$$

where ΔLon and ΔLat are grid steps (in km) along the longitude and latitude, respectively. In this work the spatial TEC gradients (in mTECu/km) were calculated for the studied region using UQRG GIMs (15 min cadence, grid points separated by 5° in longitude and 2.5° in latitude) provided by CDDIS (The Crustal Dynamics Data Information System). The GIMs were cropped accordingly to the boundaries of the studied region (Fig. 1).

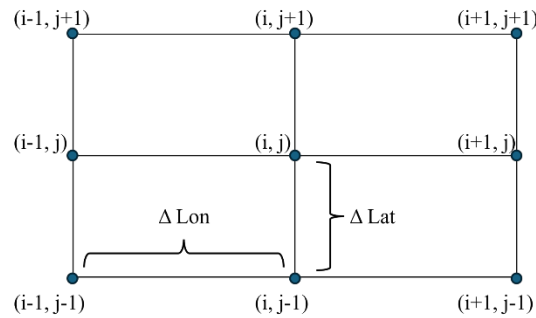


Figure 2: Scheme of the calculation of the spatial TEC gradients using TEC maps (adopted from [3]).

IONOSPHERIC GRADIENTS - APPROACH B: CALCULATION OF ∇TEC USING A NETWORK OF GEODETIC RECEIVERS

For this approach we selected six stations from the RENEP network: by three receivers in the western and eastern parts of Portugal, respectively, and by two receivers in the northern, middle and southern parts, respectively, as shown in Fig. 3 and listed in Tab. 1. The gradients were calculated using Eq. 1-2 using closest stations along the latitude ($\nabla_x\text{TEC}$) and longitude ($\nabla_y\text{TEC}$), see coloured slanted arrows in Fig. 3, with a final calculation of the absolute ∇TEC (Eq. 3). The receiver-based TEC gradients were later compared to the GIM-based ∇TEC : the linked stations and grid points are listed in Tab. 1.

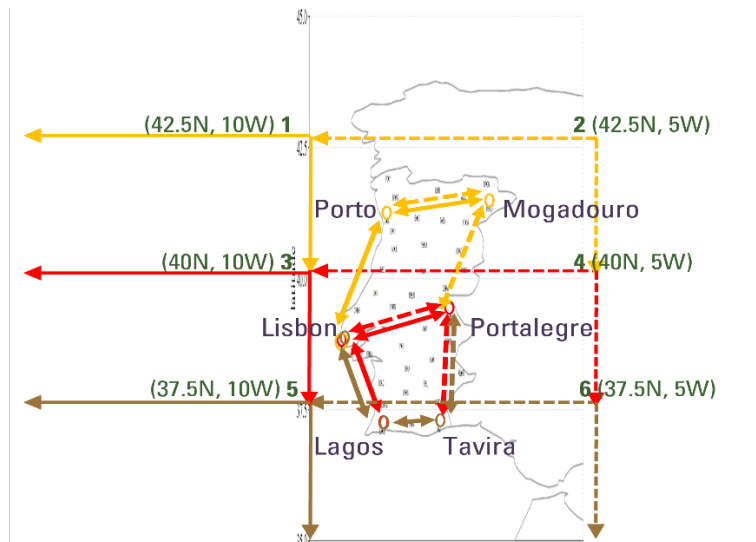


Figure 3: RENEP GNSS receivers used to calculate ∇TEC (coloured circles) and associated to them GIM grid points (numbers 1-6). Slanted arrows show directions for the ∇TEC calculations using RENEP data; vertical and horizontal arrows show for the ∇TEC calculations using GIMs.

IONOSPHERIC GRADIENTS DURING SEVERE GEOMAGNETIC STORMS OF 2023

The 25th solar cycle began in December 2019, and it is expected that the maximum of the solar activity will be reached in 2024-2026. As a result, the number of strong geomagnetic storms (storms with the minimal values of the disturbance time index (Dst) equal or below -150 nT) is expected to increase. There were three such geomagnetic storms in 2023: on March 23-24, 2023, with $\text{Dst}_{\min} = -163$ nT, on April 23-24, 2023, with $\text{Dst}_{\min} = -212$ nT and on November 4-5, 2023, with $\text{Dst}_{\min} = -172$ nT. In this work we analyse the spatial TEC gradients observed during these three storms. The Dst index variations during these months are shown in Fig. 4.

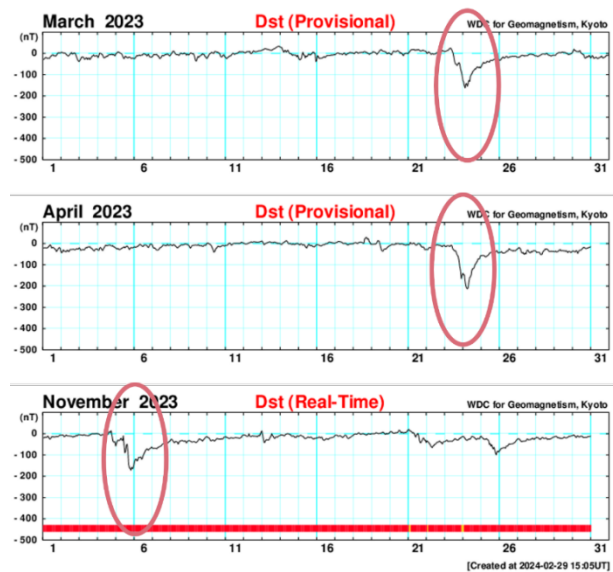


Figure 4: Dst variations in March (top), April (middle) and November (bottom) of 2023 (from the Kyoto World Data Center).

MAPS-BASED GRADIENTS

The ∇ TEC maps were calculated using GIMs for all the days of the studied months. Figures 5 and 6 show latitudinal and longitudinal means of ∇ TEC, respectively. As one can see, all three geomagnetic storms (marked by red ovals in Figs. 5 and 6) resulted in the increase of the spatial TEC gradients. Those increases were most significant in the southern half of the studied region ($\leq 35^\circ$ N, see Fig. 6), but were also visible in the norther half (35° – 45° N). No clear dependence of the storm strength (Dst_{min}) and the amplitude of ∇ TEC was found for the studied storms.

High spatial TEC gradients were also observed during geomagnetically quiet days (see Fig. 4) of March 17, 2023, and November 7, 2023 (marked by blue ovals in Figs. 5 and 6). Similar to the cases of the geomagnetic storms, during those days high ∇ TEC were observed over all studied latitudes in the studied regions with highest values in the southern half. These quiet-day high ∇ TEC may be related to some conditions in the equatorial ionosphere, like the equatorial electrojet (EEJ) variability and equatorial plasma bubbles (EPB) formation.

Individual ∇ TEC maps (15 min cadence) for the days before, during and after the storms can be found in the Supplementary Material. The time variations of ∇ TEC consists of extremely high values of ∇ TEC during the active storm phase with very fast recovery to the quiet values. The highest values are most often observed in the southern half of the studied region, but during the most active phase of the storm high ∇ TEC were observed even at latitudes of 40 – 45° N.

Figure 7 shows time variations of ∇ TEC in the area around several locations: Porto, Lisbon, Lagos, Malaga (Iberian Peninsula), Ponta Delgada (Azores), Funchal (Madeira) and Las Palmas (Canary Islands). As one can see, the highest ∇ TEC values were obtained for the southern locations (Madeira and Canary Islands), however, the city of Malaga (36° N) presents an interesting case of a location that's from one hand is quite to the north, but with regularly appearing high ∇ TEC of comparing order as ∇ TEC for, e.g., Las Palmas (27.5° N). Also, while map-averaged ∇ TEC do not exceed the threshold of 150 mTECu/km (a dangerous ionospheric storms, [2]), for some locations ∇ TEC may reach values of ~ 100 mTECu/km (e.g., in March 2023 at Madeira and Azores and in April 2023 at Canary Islands), which are quite close to this threshold.

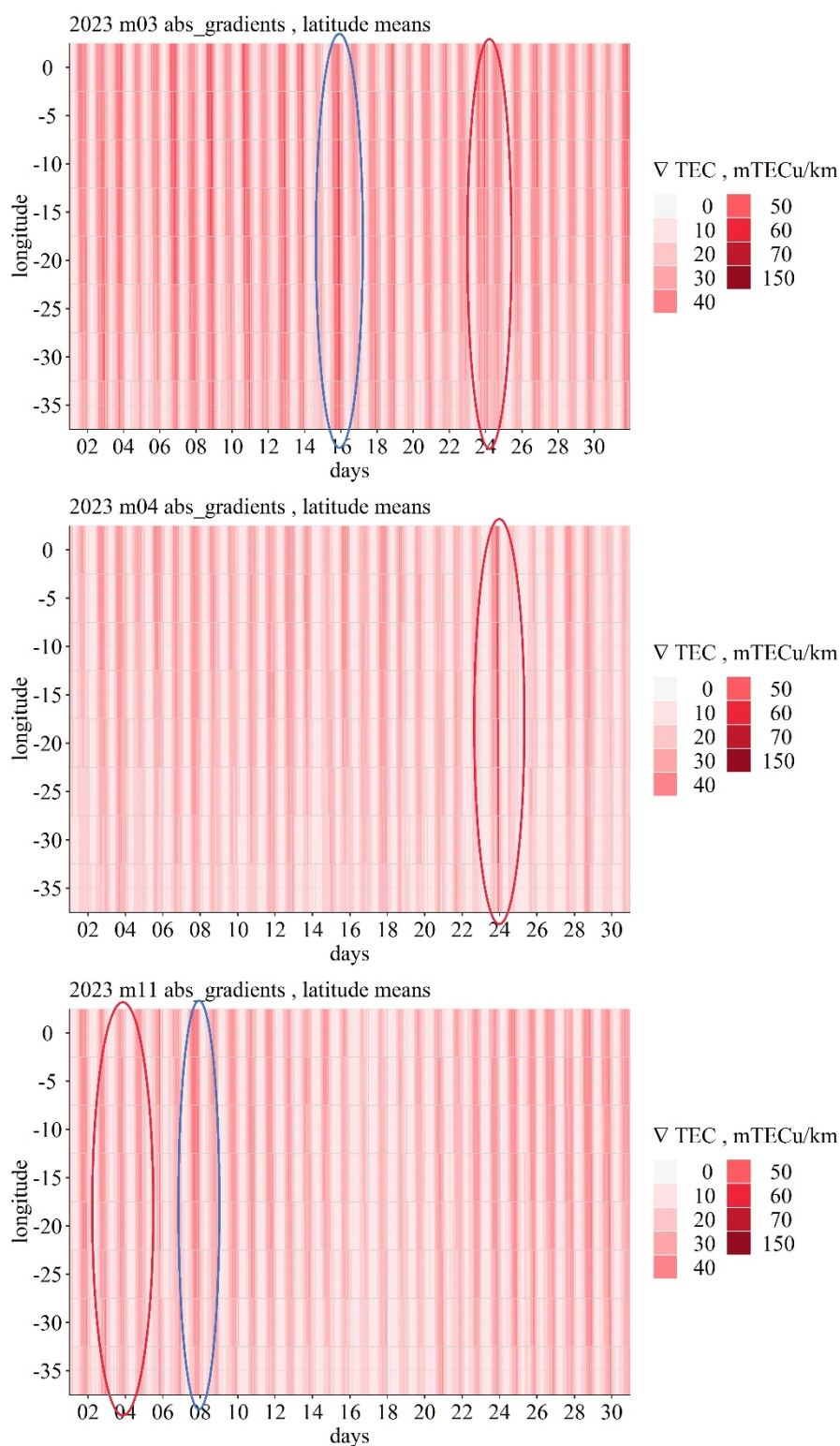


Figure 5: Latitudinal means of the spatial TEC gradients for March (top), April (middle) and November (bottom) of 2023. Red ovals mark days of the geomagnetic storms, blue ovals mark geomagnetically quiet days with high ∇TEC .

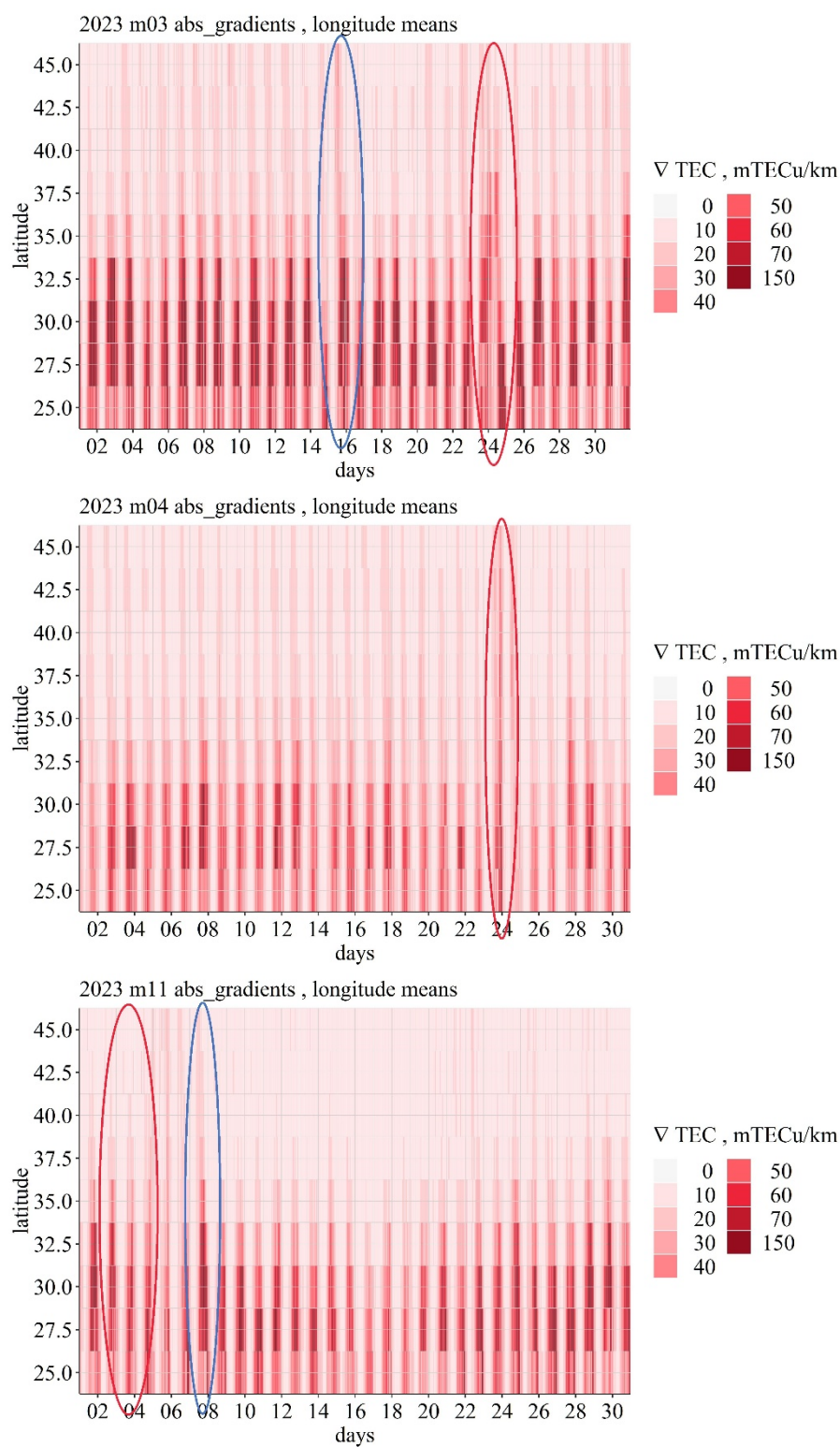


Figure 6: Same as Figure 5 but for the longitudinal means.

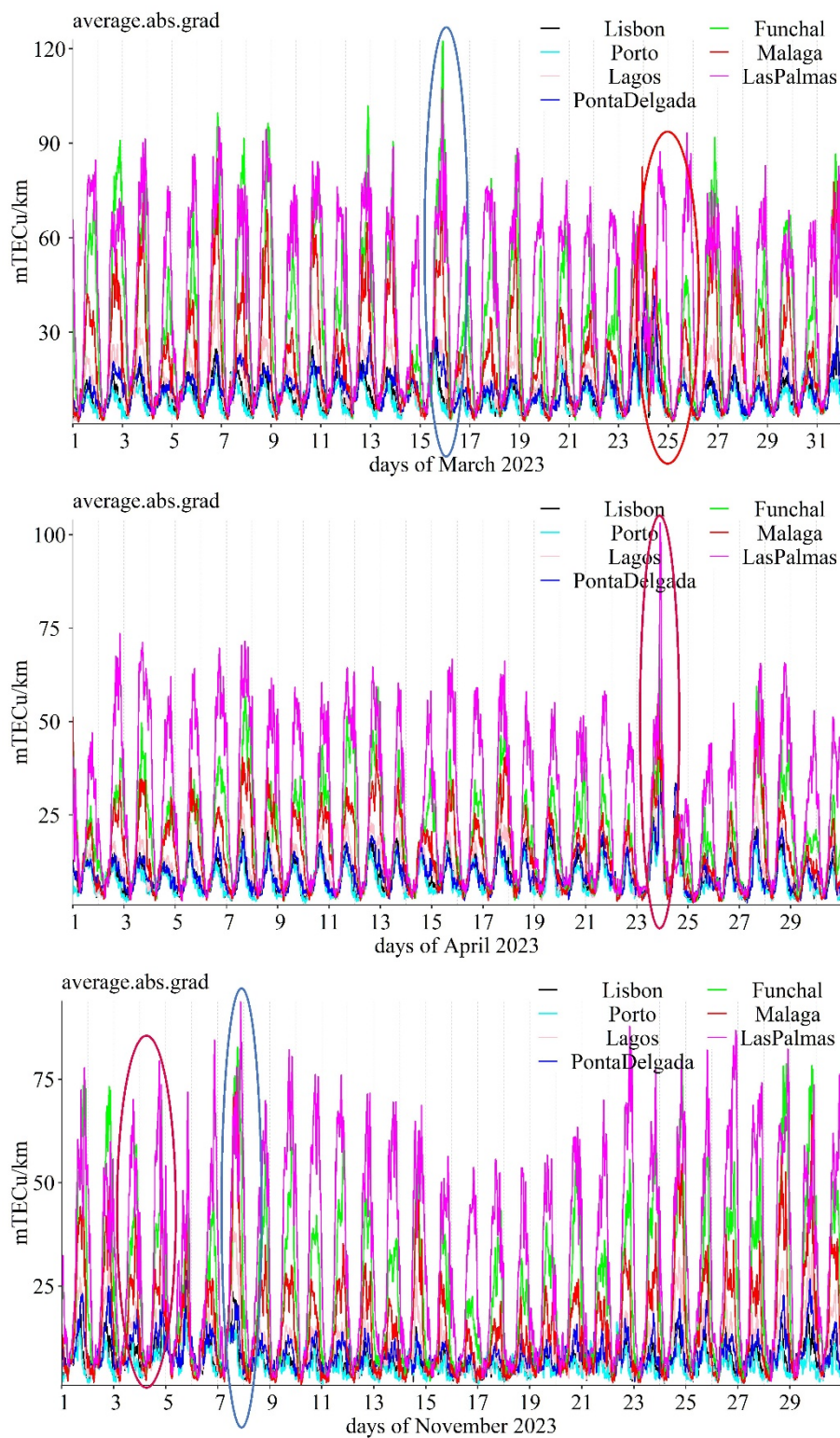


Figure 7: Spatial TEC gradients obtained for individual locations (see legend) for March (top), April (middle) and November (bottom) of 2023.

RECEIVERS-BASED GRADIENTS

Due to the availability of the RENEP RINEX files of a certain format, the RENEP TEC data were obtained only for two of the geomagnetic storms of 2023: in March and April. ∇ TEC were calculated for six Portuguese locations (see examples in Figs. 8 and 9). The comparison of the GIM-based and receiver-based ∇ TEC (Figs. Figure 8-9 and Tab. 1) shows that while for the most of the

geomagnetically quiet days the GIM-based and receiver-based ∇ TEC data are very similar, for some days, mostly geomagnetically active, the difference may be very high (up to ~ 100 mTECu/km). To our mind, the main factors for the differences in the ∇ TEC values obtained using these two methods are the data availability and data quality, and the spatial resolution. As one can see, the receiver-based ∇ TEC data have gaps and higher time variability. The latter can be both due to (e.g.) technical problems with receivers, and due to a high spatial variability of TEC (and ∇ TEC, consequently) during a geomagnetically active days that are smoothed out when GIMs are constructed. Further studies are needed to clarify this.

However, some conclusions on the usability of the receiver-based ∇ TEC data can be made. First, as was said before, for most of the days the root mean squared errors (RMSE, calculated for the receiver-based ∇ TEC using the GIM-based ∇ TEC as “true” values) are small (< 10 mTECu/km). Thus, data from geodetic receiver networks may be used to calculate local ∇ TEC. Second, as is shown in Tab. 1, RMSE are systematically higher for the southern stations (Lagos and Tavira). Third, the ∇_x TEC values are systematically higher than the ∇_y TEC values. Similar results were obtained previously in an analysis of geomagnetic storms that took place in 2015 and 2017 [4].

On the other hand, the RMSE values are event-dependent and location-dependent: for the central (Lisbon and Portalegre) and northern (Porto and Mogadouro) stations the RMSE values for March 2023 were higher than for April 2023, while for the southern stations (Lagos and Tavira) the RMSE values for April 2023 were higher than for March 2023.

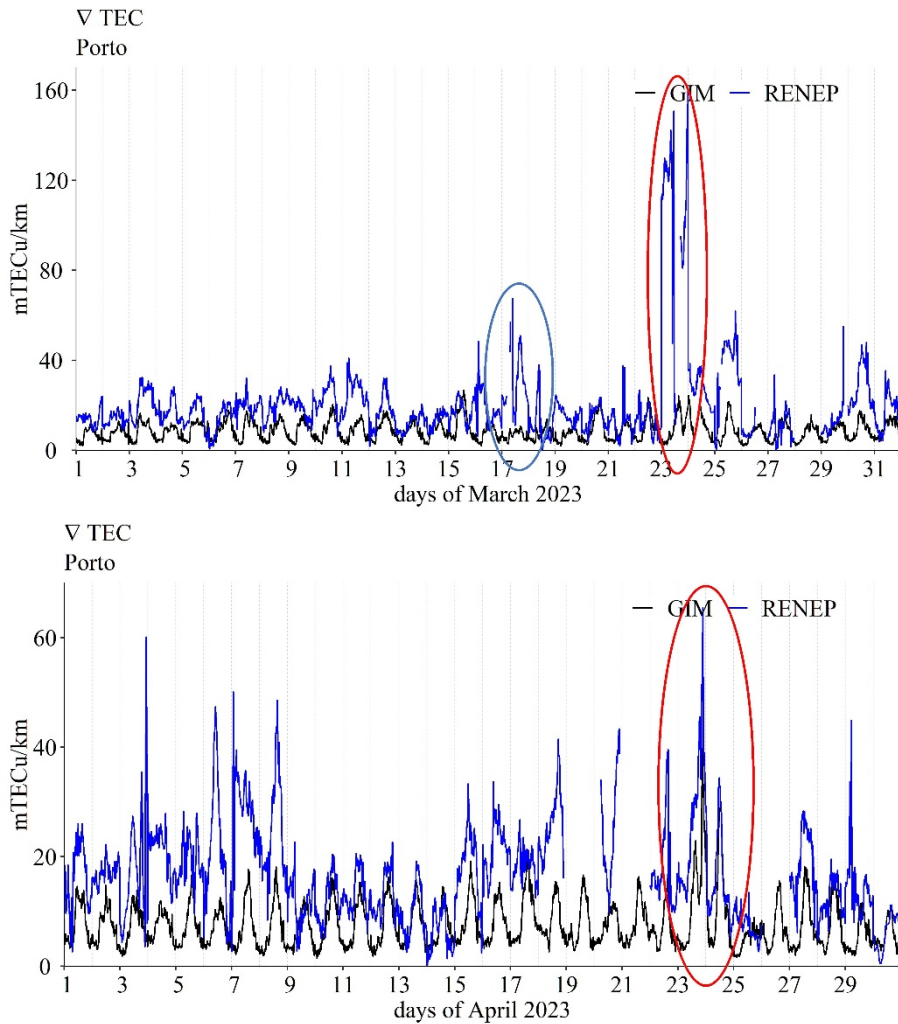


Figure 8: GIM-based (black) and receiver-based (blue) ∇ TEC obtained for locations close to Porto for March (top) and April (bottom) 2023. Red ovals mark days of the geomagnetic storms, blue oval marks geomagnetically quiet days with high ∇ TEC.

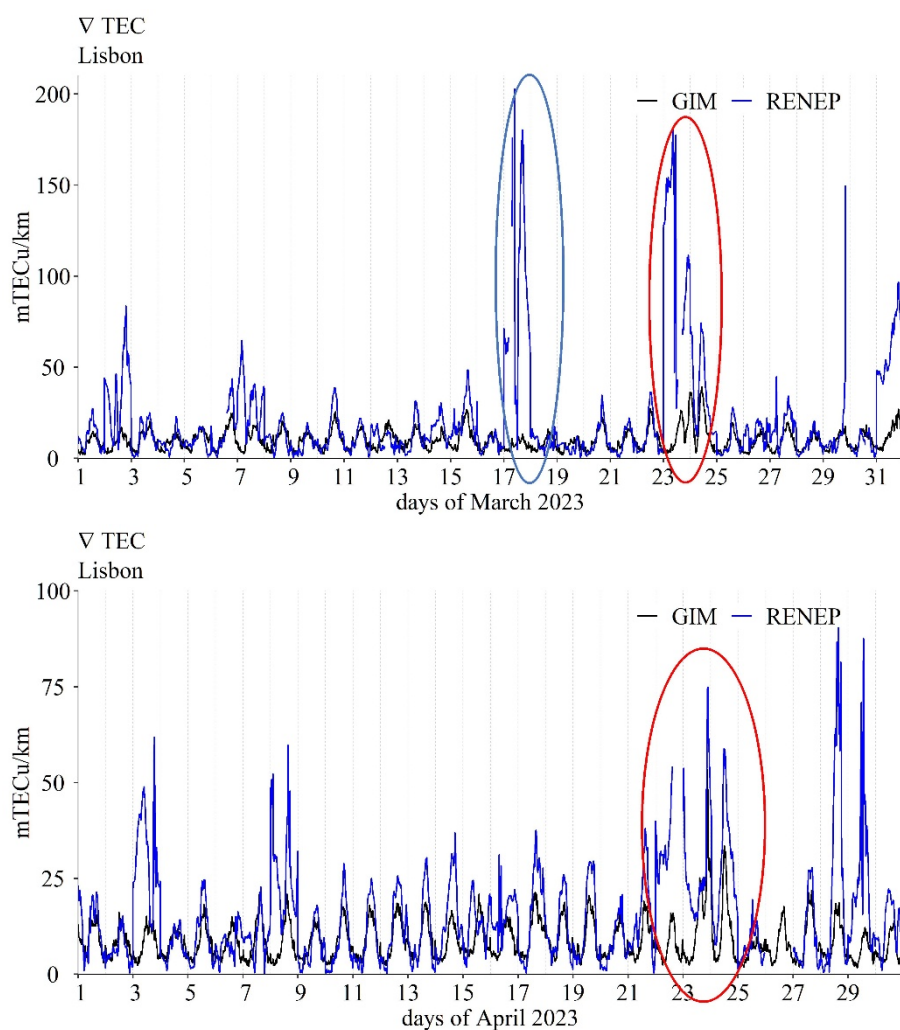


Figure 9: Same as Figure 8 but for Lisbon.

Table 1: RMSE of the receiver-based ∇ TEC for six Portuguese stations (comparing to the GIM-based ∇ TEC).

Grid point # vs Location	RMSE (∇ TEC), mTECu/km		RMSE (∇_x TEC), mTECu/km		RMSE (∇_y TEC), mTECu/km		Means
	March 2023	April 2023	March 2023	April 2023	March 2023	April 2023	
1 vs Porto	21.7	12	23.8	13	9.3	6.8	14.4
2 vs Mogadouro	21	9.3	25	15.7	8.4	3.6	13.8
3 vs Lisbon	28.7	12.6	20.1	9.3	25.1	15.3	18.5
4 vs Portalegre	20.4	11.7	21	10.4	12.3	12.5	14.7
5 vs Lagos	22	33.1	10.8	34.2	25.4	15.5	23.5
6 vs Tavira	10.4	32.4	12.18	34.6	12.5	12.9	19.2
Means	19.6		19.2		13.3		17.4

CONCLUSIONS

GIMs can be used to study spatial TEC gradients during quiet and disturbed periods for the studied region, however TEC maps with higher spatial resolution (e.g., $1^\circ \times 1^\circ$) should be used in further studies.

For the studied three severe geomagnetic storms ($Dst < -150$ nT) of 2023 high spatial TEC gradients in the studied region were observed during the storm days.

However, geomagnetic storms are not the only source of high TEC gradients: in the southern half of the studied region plus a city of Malaga high spatial TEC gradients regularly appear during geomagnetically quiet periods.

Geodetic receivers' data can be used to calculate spatial TEC gradients, however further studies are needed to estimate errors and find solutions to mitigate found problems that include but not limited to the following list:

- small scale irregularities of TEC that may affect final ∇ TEC values,
- data gaps and a procedure for data substitution,
- quality of receivers' performance,
- a "southern coast issue" – since there are no RENEP receivers in the Atlantic Ocean to the south of the Portuguese coastline, the methodology for the ∇_y TEC calculation for the southern stations is different: this gradient is calculated using northward located stations instead of southward located ones.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to acknowledge the Direção Geral do Território (DGT) for making ReNEP data available and personally Helena Ribeiro (RENEP). The RENEP RINEX 2.11 files are available through <https://renep.dgterritorio.gov.pt>.

The Dst index is available at the Kyoto World Data Center at https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_provisional/index.html.

The global ionosphere vertical total electron content (TEC) maps (GIMs) are rapid high-rate solution GIMs generated by UPC (Spain) – UQRG maps, available at the NASA EOSDIS CDDIS website [5]: https://cddis.nasa.gov/Data_and_Derived_Products/GNSS/atmospheric_products.html.

The work was supported through the project PROSE: P3-SWE-XXXVII - SWE PRODUCTS FOR SOUTHERN EUROPE - PHASE 1", funded by ESA.

The authors are grateful to Yuri Yasyukevich and his team for the development of the "GNSS Lab" software and technical support.

REFERENCES

- [1] Barata, T. (2023): "Space Weather effects on the Infrastructure and GNSS systems". In: "Space weather influence on the ionosphere and its potential threats to GNSS services: focus on the Portuguese territories", A. Morozova, T. Barlyaeva (Eds.), Materials of the on-line workshop "Space weather influence on the ionosphere and its potential threats to GNSS services: focus on the Portuguese territories", October 11, 2023, on-line. ISBN: 978-989-33-5493-3, 978-989-33-5492-6. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.24572977.v1>
- [2] Jakowski, N. and Hoque, M. M. (2019): "Estimation of spatial gradients and temporal variations of the total electron content using ground-based GNSS measurements". Space Weather, 17, 339–356. <https://doi.org/10.1029/2018SW002119>
- [3] Liu, Q., Hernández-Pajares, M., Yang, H., Monte-Moreno, E., García-Rigo, A., Lyu, H., Olivares-Pulido, G. and Orús-Pérez, R. (2022): "A New Way of Estimating the Spatial and Temporal Components of the Vertical Total Electron Content Gradient Based on UPC-IonSAT Global Ionosphere Maps". Space Weather, 20(2), e2021SW002926, <https://doi.org/10.1029/2021SW002926>
- [4] Barata, T. and Morozova, A. (2023): "Ionospheric gradients". In: "Space weather influence on the ionosphere and its potential threats to GNSS services: focus on the Portuguese territories", A. Morozova, T. Barlyaeva (Eds.), Materials of the on-line workshop "Space weather influence on the ionosphere and its potential threats to GNSS services: focus on the Portuguese territories", October 11, 2023, on-line. ISBN: 978-989-33-5493-3, 978-989-33-5492-6. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.24572977.v1>
- [5] Noll, C. (2010): "The Crustal Dynamics Data Information System: A resource to support scientific analysis using space geodesy",

Advances in Space Research, 45, 12, 1421-1440, ISSN 0273-1177, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2010.01.018>

SUPPLEMENTARY MATERIAL

Animations showing time variations of the TEC gradients for all three studied storms can be found at Morozova, A. and Barata, T. (2024): "Spatial TEC gradients for geomagnetic storms in March, April and November of 2023 for an Eastern North-Atlantic Midlatitudinal Zone". figshare. Figure. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.26927458.v1>

Mapa de Declinaciones Magnéticas de la Península Ibérica y las Islas Baleares de la época 2020.0

Magnetic Declination Map of the Iberian Peninsula and the Balearic Islands for the epoch 2020.0

NÚÑEZ, Alberto ⁽¹⁾; TORDESILLAS, José Manuel ⁽²⁾

⁽¹⁾ Área de Geomagnetismo, Instituto Geográfico Nacional, Madrid.

⁽²⁾ Área de Geomagnetismo, Instituto Geográfico Nacional, Observatorio Geofísico de Toledo, Toledo.

Autor correspondiente: anmurillo@transportes.gob.es

SUMMARY

At the end of 2023, the Instituto Geográfico Nacional (IGN) from Spain published the Magnetic Declination Map of the Iberian Peninsula and the Balearic Islands for the epoch 2020.0, following the recommendations of the International Association of Geomagnetism and Aeronomy (IAGA) regarding the publication interval of the cartography of each geomagnetic component. This map shows, at a scale of 1:2,000,000, the declination isolines, or isogones, and the isolines of secular variation, or isopores, both referring to the common date of 1st January 2020 and covering the complete territory of the Iberian Peninsula and the Balearic Islands. In this regard, we have recovered the aforementioned representation unit, which had been previously used in the geomagnetic cartography of the IGN for the epochs 1960.0 and 1970.0, and we have consequently achieved the desirable continuity in the representation of the geomagnetic field in the Iberian Peninsula.

As an additional novelty, the 2020.0 Magnetic Declination Map has been prepared by means of the regional modelling of the main geomagnetic internal field in the period 2014.5-2020.5. This geomagnetic model has been generated using Spherical Cap Harmonic Analysis (SCHA) techniques, in clear contrast with the polynomial isoporic modelling applied in precedent epochs. In this context, the new model has allowed us to compute the magnetic declination at 2020.0 at 751 map stations deployed across mainland Spain and the Balearic Islands, where the IGN had observed the complete internal field, or total field, between the years 1988 and 1993. Furthermore, the 2020.0 declination has been modelled at 348 map stations located in continental Portugal, by means of the declination values used in the production process of the Geomagnetic Map of the Iberian Peninsula for the epoch 1960.0.

PALABRAS CLAVE

Geofísica, Geomagnetismo, Cartografía magnética, Declinación magnética, Variación secular, Isógona, Isópóra.

INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

El Instituto Geográfico Nacional (IGN) publica la cartografía magnética oficial de España, en cumplimiento de sus funciones de elaboración de cartografía geomagnética y realización de trabajos y estudios sobre geomagnetismo, encomendadas por el Real Decreto 253/2024. Esta cartografía representa la distribución espacial en el territorio de las distintas componentes del campo, con referencia a una época determinada. En conjunto, los mapas geomagnéticos publicados por el IGN abarcan distintas épocas comprendidas entre 1924.0 (1 de enero de 1924) y 2020.0 (1 de enero de 2020).

La cartografía magnética oficial se divide en dos grupos de publicaciones bien diferenciados. Por una parte, el IGN edita el Mapa Geomagnético de España con una periodicidad de 10 años, siguiendo las recomendaciones de la IAGA (*International Association of Geomagnetism and Aeronomy*). Actualmente, el Mapa consta de cuatro hojas diferenciadas por la componente o elemento del campo magnético terrestre que representan: Mapa de Declinaciones Magnéticas, Mapa de Isodinámicas Horizontales, Mapa de Isodinámicas Verticales y Mapa de Isodinámicas Totales. Estos mapas muestran, respectivamente, las isolíneas de los elementos declinación magnética (D), componente horizontal (H), componente vertical (Z) y campo total (F), siempre referidos a época común.

La primera realización del Mapa Geomagnético corresponde a la época 1924.0 (publicado bajo la denominación de Mapa Magnético de España), y constaba de las hojas de Declinaciones Magnéticas, Isodinámicas Horizontales (figura 1) e Isoclinas (que representaba la componente inclinación magnética, I). La última edición del Mapa Geomagnético corresponde a la época 2015.0, ya con los cuatro mapas de isolíneas de las componentes D, H, Z, F. En la figura 2, se muestra la hoja de Isodinámicas Horizontales

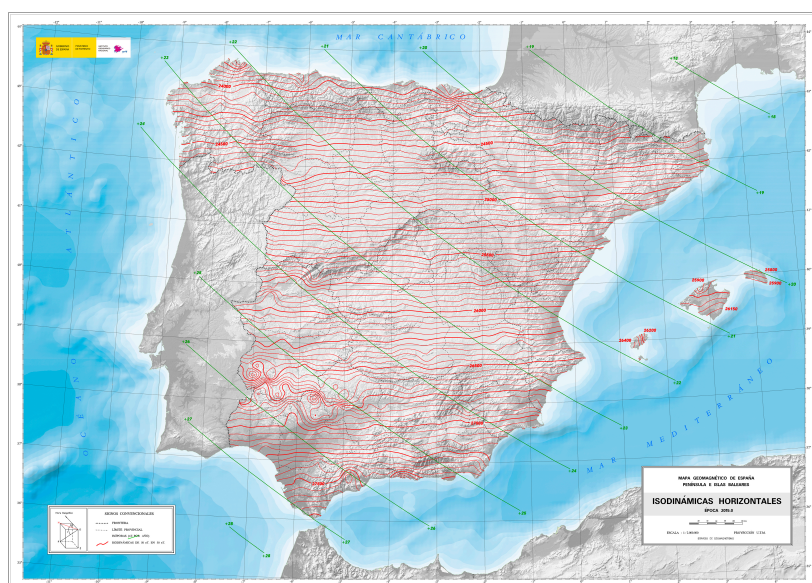


Figura 2: Mapa Geomagnético de España. Isodinámicas horizontales. Época 2015.0. Se representan las isodinámicas horizontales en color rojo, y las isóporas de la componente horizontal en color verde.



Figura 3: Mapa Geomagnético de España. Declinaciones Magnéticas. Época 2015.0. Se representan las isógonas en colores rojo (valores de declinación oeste) y azul (valores de declinación este), y las isóporas de la declinación en color verde.

CARACTERÍSTICAS DEL MAPA DE DECLINACIONES MAGNÉTICAS DE LA ÉPOCA 2020

El Mapa de Declinaciones muestra la distribución espacial de los valores de declinación magnética y de su variación secular con referencia a la época 2020.0 (01/01/2020), por medio de las isolíneas correspondientes: isolíneas de declinación o isógonas, e isolíneas de variación secular o isóporas.

Las características cartográficas más relevantes del Mapa son las siguientes:

- Sistema geodésico de referencia: ETRS89
- Proyección cartográfica: UTM (huso 30)
- Escala: 1:2.000.000
- Unidad de representación: Península Ibérica e Islas Baleares

Con el fin de sintetizar los valores de declinación y variación secular en la época de referencia 2020.0, se ha realizado una modelización regional del campo geomagnético interno principal en el periodo 2014.5-2020.5 sobre la Península y las Islas Baleares. Este modelado permite obtener la declinación del campo principal, de origen nuclear, así como su variación secular, en 2020.0. Se han utilizado técnicas de análisis armónico en casquetes esféricos (Spherical Cap Harmonic Analysis, SCHa), presentadas por Haines (1985), que introducen un claro contraste con la modelización isopórica polinomial que había sido utilizada en la cartografía geomagnética del IGN de épocas anteriores.

MODELO DE CAMPO GEOMAGNÉTICO PRINCIPAL EN 2014.5-2020.5 SOBRE LA PENÍNSULA IBÉRICA Y LAS ISLAS BALEARES

El modelo de campo principal empleado permite sintetizar las componentes del campo principal X (Norte), Y (Este), Z, D, I, F, H, y su variación secular correspondiente, en el periodo 2014.5-2020.5 (de 1 de julio de 2014 a 1 de julio de 2020). Como técnica de modelado, se ha escogido la técnica revisada de análisis armónico en casquetes esféricos, R-SCHa (Revised Spherical Cap Harmonic Analysis), de acuerdo con el trabajo de Thébault et al. (2006), que permite invertir datos geomagnéticos observados tanto en tierra como en altura. El modelo se encuentra publicado en los trabajos de Puente Borque et al. (2023a,b). Los valores modelizados en 2020.0 de las componentes magnéticas y su variación secular se encuentran disponibles en la página web del IGN (IGN, 2021): <https://www.ign.es/web/ign/portal/modelo-geomagnetico-referencia-2020>.

Como bases de partida en el modelado, se han utilizado observaciones contenidas en un cono esférico truncado, cuyo casquete de base está situado sobre Iberia y Baleares. Como se ve en la figura 4, el casquete está centrado en el Observatorio Geofísico de San Pablo de los Montes-Toledo (39.547° N, 4.349° O), operado por el IGN e integrado en la Red Mundial de Observatorios Geomagnéticos INTERMAGNET (código SPT). El casquete tiene un radio de 7° (Puente Borque et al., 2023b). Las observaciones utilizadas en el modelo tienen tres orígenes diferenciados:

- Satélites de la constelación Swarm (Agencia Espacial Europea, European Space Agency, ESA)
- Observatorios geomagnéticos de España y Portugal
- Estaciones seculares de España y sur de Francia

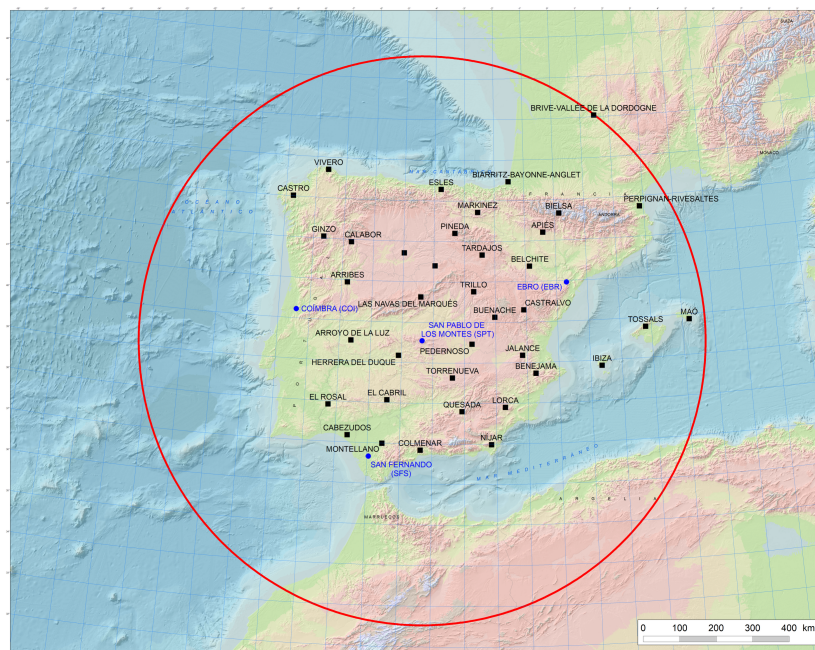


Figura 4: Observatorios geomagnéticos operativos en la Península Ibérica (representados por círculos azules) y estaciones seculares con un mínimo de dos observaciones en el periodo 2015-2020 (representadas por cuadrados negros), en los cuales se han adquirido parte de los datos empleados en la modelización del campo principal en 2014.5-2020.5 sobre la Península Ibérica y las Islas Baleares. Se muestra también el casquete esférico empleado en la modelización del campo (representado por circunferencia con trazo rojo).

DATOS UTILIZADOS

En la elaboración del modelo de campo principal 2014.5-2020.5 para Iberia y Baleares, y de la cartografía de declinaciones 2020.0 resultante, se han empleado datos satelitales de la constelación Swarm de la Agencia Espacial Europea (ESA) (<https://earth.esa.int/eogateway/missions/swarm>) y datos de tierra, obtenidos en los observatorios geomagnéticos y las estaciones seculares (figura 4).

En relación a los datos de los satélites Swarm, estos son valores de las componentes geomagnéticas X, Y, Z, adquiridos entre julio de 2014 y junio de 2020 a bordo de los tres satélites de la constelación, Swarm-A, Swarm-B, Swarm-C (IGN, 2023). Estos valores forman parte del producto MAGX_LR_1B (Mag-L), ofrecido por la ESA, que consiste en datos magnéticos vectoriales que presentan una frecuencia de muestreo de 1 Hz (Olsen et al., 2013). El producto Mag-L es un producto de clase Level1b. Los productos de este tipo presentan series temporales de medidas corregidas, calibradas y que han pasado control de calidad, las cuales están dadas en unidades físicas del Sistema Internacional y en marcos de referencia geolocalizados (ESA, 2024).

En cuanto a los datos de los observatorios geomagnéticos, se han utilizado datos definitivos de minuto, adquiridos por los cuatro observatorios geomagnéticos actualmente operativos en la Península Ibérica (figura 4): San Pablo de los Montes (SPT), Ebro (EBR), San Fernando (SFS) y Coimbra (COI). Estos son valores de las componentes X, Y, Z observados en el periodo 2014.5-2020.5, corregidos de bases y depurados de cualquier perturbación artificial.

Los datos de estaciones seculares corresponden a valores de las componentes D, H, Z, F observados en el periodo 2015-2020, sólo en estaciones que cuentan con un mínimo de 2 observaciones para este periodo (figura 4). Se han utilizado datos de 35 estaciones situadas en España y pertenecientes a la Red de Estaciones Seculares del Instituto Geográfico Nacional. Adicionalmente, se han empleado las observaciones de 3 estaciones adicionales del *Institut de Physique du Globe de Paris* (IPGP), situadas en el sur de Francia. En relación con el territorio continental de Portugal, contenido también en el casquete esférico en estudio, se analizaron preliminarmente los datos adquiridos en las estaciones seculares del *Instituto Português do Mar e da Atmosfera* (IPMA) en los años 2006 y 2013. Sin embargo, al encontrarse estas observaciones fuera de la ventana temporal común escogida para el modelado geomagnético (2014.5-2020.5), no fue posible emplearlos en la citada modelización.

INSTRUMENTACIÓN

En cuanto a la instrumentación a bordo de cada uno de los satélites de la constelación Swarm, esta consiste en un magnetómetro escalar (Absolute Scalar Magnetometer, ASM) y un magnetómetro vectorial (Vector Field Magnetometer, VFM) (Olsen et al., 2019). ASM es un magnetómetro de bombeo óptico de helio, mientras que VFM es un magnetómetro fluxgate de núcleo anular.

Para la adquisición de datos en el Observatorio Geofísico de San Pablo de los Montes, se ha utilizado a la instrumentación principal relacionada en la tabla 1. En esta misma tabla se relacionan los instrumentos empleados por el IGN en la observación de las estaciones seculares situadas en España.

En la memoria del Mapa de Declinaciones Magnéticas de la época 2020.0 (IGN, 2023) puede encontrarse la relación completa de dispositivos e instrumentos empleados en la adquisición de los datos del proyecto, incluyendo la instrumentación empleada en la totalidad de los observatorios y estaciones seculares presentados en la sección "Datos utilizados" del presente artículo.

Tabla 1: Instrumentación geomagnética utilizada en el Observatorio Geofísico de San Pablo de los Montes (SPT) y en la observación de las estaciones seculares de España.

Instrumentación principal del Observatorio Geofísico de San Pablo de los Montes	Instrumentación de observación de las estaciones seculares de España
Magnetómetro triaxial suspendido fluxgate FGE	Declinómetro/inclinómetro
Declinómetro / inclinómetro (sonda fluxgate Bartington MAG-01H)	Magnetómetro de protones G-856 AX
Magnetómetro de efecto Overhauser GSM-90F1	Magnetómetro de efecto Overhauser GSM-19
	Magnetómetro triaxial fluxgate FGE

RESULTADOS DE LA MODELIZACIÓN

Por medio del modelo geomagnético obtenido para el periodo 2014.5-2020.5 en Iberia y Baleares, se han obtenido dos tipos de valores sintéticos, en función de la naturaleza u origen del campo geomagnético interno. Por una parte, se ha calculado el campo interno principal y su variación secular en 2020.0, en una malla regular de puntos con coordenadas geográficas latitud y longitud, que abarca la Península y las Islas Baleares. Se ha obtenido por tanto una red de puntos, con todos los elementos magnéticos del campo principal X, Y, Z, H, F, D, I, y su variación secular correspondiente, sintetizados en 2020.0, y que son fácilmente accesibles en la página web del IGN (IGN, 2021). Más información sobre el cálculo de los elementos del campo y su variación secular en la citada malla regular puede encontrarse en la memoria del Mapa de Declinaciones Magnéticas de la época 2020.0 (IGN, 2023).

Por otra parte, se ha sintetizado el campo interno completo o total (suma del principal más el cortical) para la época 2020.0 en 1099 estaciones de mapa (Puente Borque et al., 2023b), distribuidas en el territorio en estudio (figura 5). En estas estaciones, se cuenta con valor del campo total correspondiente a una fecha determinada. De este conjunto de estaciones de mapa, 751 están situadas en España Peninsular, en las cuales se observaron las componentes D, H, Z en 1988-1993 (IGN, 2023). Las restantes 348 se sitúan en el territorio continental de Portugal, y proporcionan valores de D, H, Z reducidos o trasladados a la época 1960.0, que fueron utilizados en la generación del Mapa Geomagnético de la Península Ibérica de la época 1960.0 (Peña Geromini, 1963), un proyecto cartográfico que fue llevado a cabo conjuntamente por el entonces Instituto Geográfico y Catastral (antecesor directo del IGN) y el Serviço Meteorológico Nacional de Portugal.

Tanto en las estaciones de mapa situadas en España como en las situadas en Portugal, el proceso de síntesis del campo interno completo en 2020.0 requirió, en primera instancia, la traslación de los valores del campo completo de cada estación, desde su fecha original hasta la época 2015.0 (Puente Borque et al., 2023b), mediante la variación secular proporcionada por el modelo global de campo geomagnético COV-OBS.x2 (Huder et al., 2020). A continuación, se sustrajo el campo principal en la época 2015.0, calculado previamente mediante el modelo geomagnético de Iberia y Baleares en 2014.5-2020.5 (Puente Borque et al., 2023a,b), ya citado en el presente artículo extendido. Por tanto, se obtuvo de esta forma el campo cortical en cada estación de mapa, considerado atemporal. Por último, se realizó la suma del campo cortical y el campo principal en la época 2020.0, calculado nuevamente en cada estación por medio del citado modelo geomagnético, dando como resultado el campo completo en 2020.0 en cada estación.

TRAZADO DE ISÓPORAS DE DECLINACIÓN EN 2020.0

A partir de los valores de variación secular del elemento declinación magnética del campo principal en 2020.0, calculado en cada punto de la malla regular de valores ya mencionada (IGN, 2021), se ha llevado a cabo un proceso de interpolación, que ha dado como resultado las isóporas de declinación en 2020.0. Estas isolíneas han sido posteriormente recortadas, generalizadas y suavizadas manualmente.

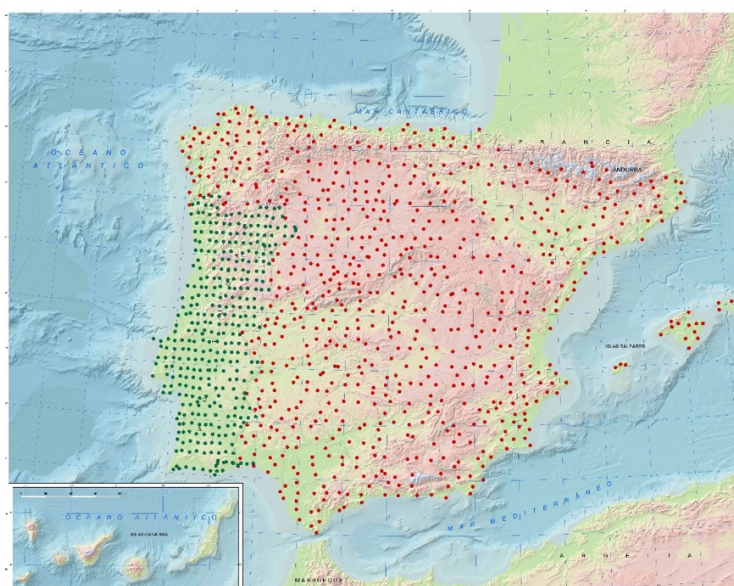


Figura 5: Estaciones de mapa utilizadas en la síntesis del campo geomagnético interno completo en 2020.0

TRAZADO DE ISOLÍNEAS DE DECLINACIÓN EN 2020.0

La producción de las isolíneas de declinación magnética en 2020.0 ha requerido un proceso más complejo. Se ha partido de los valores de declinación del campo total en 2020.0, ya sintetizado en las estaciones de mapa de España y Portugal (IGN, 2023). Estos valores han sido interpolados de forma preliminar, para posteriormente ser analizados con detalle, con el fin de descartar del proceso cartográfico las estaciones de mapa que resultaban encerradas por estas isolíneas y que además presentaban valores anómalos.

Este análisis ha consistido en dos partes. Primeramente se ha calculado la longitud de onda mínima del mapa (media de las distancias de separación entre las estaciones de mapa), que resultó ser 419.229,943 m. A continuación, se seleccionaron las estaciones encerradas por las isolíneas preliminares que cumplían los siguientes requerimientos: situadas a distancia menor que la longitud de onda, situadas en zona con ausencia de anomalía magnética, y situadas en zona donde las isógonas de las cartografías anteriores presentaban un comportamiento distinto. Se considera que las estaciones seleccionadas con estos criterios proporcionan valores que constituyen un artificio matemático de la interpolación, y por tanto se descartaron estas estaciones del proceso cartográfico. Puede encontrarse información detallada del análisis realizado en el trabajo de Núñez et al. (2023).

Los valores de declinación en 2020.0 en las estaciones restantes fueron finalmente interpolados, para obtener nuevas isolíneas de D en 2020.0. Se procedió a continuación a realizar la generalización ráster de estas isolíneas, en un proceso que incluyó etapas de remuestreo, suavizado de la superficie y extracción de las isolíneas definitivas, y que también puede consultarse en la referencia de Núñez et al. (2023). Finalmente, las isolíneas generalizadas fueron editadas de forma manual, y posteriormente recortadas tomando como referencia la línea de costa y las fronteras de España con Francia y Andorra. En esta última etapa, se conservaron las isolíneas comprendidas entre las Islas Baleares y las que limitan el archipiélago a este y oeste.

ADAPTACIÓN A LAS CARACTERÍSTICAS CARTOGRÁFICAS DEL MAPA GEOMAGNÉTICO DE ESPAÑA DE LA ÉPOCA 2015.0

A partir de las capas de información obtenidas, con las isóporas y las isógonas en 2020.0, se estuvo en disposición de realizar la composición del nuevo Mapa de Declinaciones Magnéticas en 2020.0. Con este fin, se optó por adaptar la cartografía a las características cartográficas de la cartografía magnética anterior (Mapa Geomagnético de España de la época 2015.0). Puede consultarse el mapa final obtenido en la figura 6.

En cuanto a la base geográfica digital, esta contiene la división provincial española y las fronteras internacionales. El modelo digital del terreno está formado en las zonas continentales por datos del NOAA con un paso de malla de 30", y en las zonas marinas, por datos del ETOPO2 pertenecientes al USGS con un paso de malla de 2' (IGN, 2023). El recuadro de coordenadas presenta las coordenadas latitud y longitud cada 5', mientras que el canevas de paralelos y meridianos guarda un intervalo de 1°.

En relación con la información temática, las isógonas se han trazado con equidistancia de 5' (30' para las isógonas maestras), en color rojo para las declinaciones con valor W, y en azul para las declinaciones con valor E. Las isóporas de declinación presentan equidistancia de 0,2' y color verde.

LÍNEAS FUTURAS DE TRABAJO

Como trabajos futuros relacionados con el Mapa de Declinaciones 2020.0, en el Área de Geomagnetismo se pretende llevar a cabo distintos proyectos con el fin de preparar la actualización de la cartografía geomagnética en la época 2025.0. Por una parte, en el año 2023 comenzó la observación del campo geomagnético en algunas estaciones de mapa de España que se descartaron como dato de entrada, por carencia de alguna componente D, H, Z, o bien como resultado del análisis de los valores sintetizados en 2020.0, por presentar valor anómalo.

Adicionalmente, y como trabajos directamente relacionados con el Mapa Geomagnético de la Península Ibérica y las Islas Baleares de la época 2025.0, se va a realizar una nueva recopilación de datos de satélites, observatorios y estaciones seculares, que servirán para modelizar el campo principal a nivel regional en esta época de referencia. A partir de este nuevo modelo, se procesarán las nuevas observaciones en las estaciones de mapa, además de las empleadas en el Mapa de Declinaciones de 2020.0. Por último, se revisará y actualizará la composición y diseño de las distintas hojas del Mapa Geomagnético (D, H, Z, F).

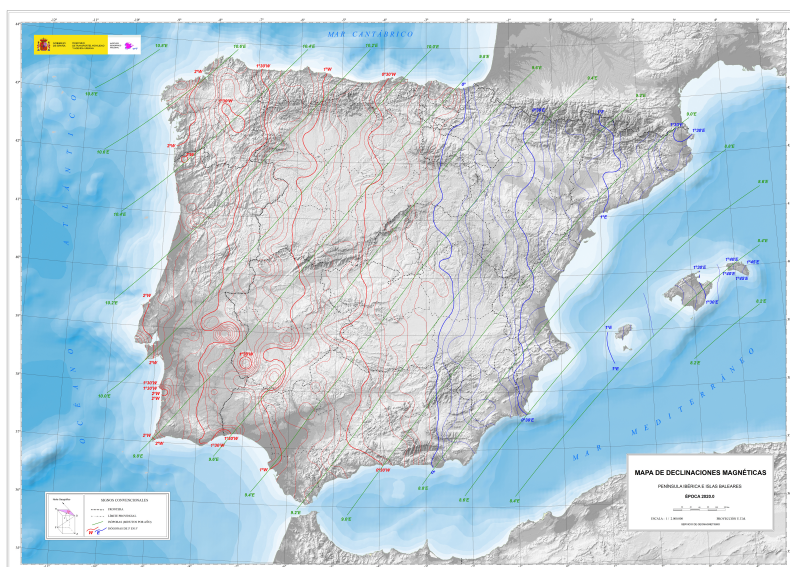


Figura 6: Mapa de Declinaciones Magnéticas de la Península Ibérica y las Islas Baleares de la época 2020.0. Se representan las isógonas en colores rojo (valores de declinación oeste) y azul (valores de declinación este), y las isóporas de la declinación en color verde.

REFERENCIAS

- [1] European Space Agency, "Swarm Level 1-B", <https://earth.esa.int/eogateway/catalog/swarm-level-1-b> (accessed on 27-09-2024).
- [2] Haines, G. (1985): "Spherical cap harmonic analysis", *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 90(B3), 2583–2591.
- [3] Huder, L., Gillet, N., Finlay, C. C., Hammer, M. D., Tchoungui, H. (2020): "COV-OBS.x2: 180 years of geomagnetic field evolution from ground-based and satellite observations", *Earth, Planets and Space*, 72(160), 1–18. <https://doi.org/10.1186/s40623-020-01194-2>.
- [4] Instituto Geográfico Nacional, "Modelo Geomagnético de referencia para la Península Ibérica y las Islas Baleares en 2020.0", <https://www.ign.es/web/ign/portal/modelo-geomagnetico-referencia-2020> (accessed on 13-12-2021).
- [5] Instituto Geográfico Nacional (2023): "Mapa de Declinaciones Magnéticas (Península Ibérica e Islas Baleares). Época 2020.0". Instituto Geográfico Nacional, Madrid.
https://www.ign.es/web/resources/acercaDe/libDigPub/Mapa_declinaciones_magneticas_2020.pdf
- [6] Núñez, A., Tordesillas, J. M., Pavón-Carrasco, F. J., Puente-Borque, M., Campuzano, S. A., Gracia-Fernández, F., Valle-Pastelero, J. L. (2023): "Preparación del mapa de declinaciones magnéticas de la Península Ibérica y las Islas Baleares de la época 2020.0", 10ª Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica-Artículos, 610-620. <https://doi.org/10.7419/162.07.2023>.
- [7] Olsen, N., Friis-Christensen, E., Floberghagen, R., Alken, P., Beggan, C. D., Chulliat, A., Doornbos, E., Teixeira da Encarnação, J., Hamilton, B., Hulot, G., Van den IJssel, J., Kuvshinov, A., Lesur, V., Lühr, H., Macmillan, S., Maus, S., Noja, M., Olsen, P. E. H., Park, J., Plank, G., Püthe, C., Rauberg, J., Ritter, P., Rother, M., Sabaka, T. J., Schachtschneider, R., Sirol, O., Stolle, C., Thébault, E., Thomson, A. W. P., Tøffner-Clausen, L., Velínský, J., Vigneron, P. and Visser, P. N. (2013): "The Swarm satellite constellation application and research facility (SCARF) and Swarm data products". *Earth, Planets and Space*, 65, 1189-1200.
- [8] Olsen, N., Hulot, G., Lesur, V., Finlay, C. C., Beggan, C., Chulliat, A., Sabaka, T. J., Floberghagen, R., Friis-Christensen, E., Haagmans, R. (2015): "The Swarm initial field model for the 2014 geomagnetic field". *Geophysical Research Letters*, 42(4), 1092-1098. <https://doi.org/10.1002/2014GL062659>.
- [9] Peña Geromini, V. (1963): "La formación del Mapa Magnético y Primer resultado comparativo de los observatorios". Instituto Geográfico y Catastral, Madrid.

- [10] Puente Borque, M., Pavón Carrasco, F. J., Núñez, A., Tordesillas, J. M. and Campuzano, S. A. (2023a): "Campo geomagnético principal y variación secular entre 2014 y 2020 para Iberia basado en la técnica R-SCHA: Optimización de la parametrización". 10ª Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica-Artículos, 590-599. <https://doi.org/10.7419/162.07.2023>.
- [11] Puente Borque, M., Pavón Carrasco, F. J., Núñez, A., Tordesillas, J. M. and Campuzano, S. A. (2023b): "Regional geomagnetic core field and secular variation model over the Iberian Peninsula from 2014 to 2020 based on the R-SCHA technique". *Earth, Planets and Space*, 75(128), 1-13. <https://doi.org/10.1186/s40623-023-01873-w>.
- [12] Real Decreto 253/2024, de 12 de marzo, por el que se desarrolla la estructura orgánica básica del Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible, y se modifica el Real Decreto 1009/2023, de 5 de diciembre, por el que se establece la estructura orgánica básica de los departamentos ministeriales (Boletín Oficial del Estado núm. 64, de 13 de marzo de 2024).
- [13] Thébault, E., Schott, J. J. and Mande, M. (2006): "Revised spherical cap harmonic analysis (R-SCHA): Validation and properties". *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 111(B1).

Recuperación y procesamiento de datos de levantamientos aeromagnéticos de la Península Ibérica, zonas marítimas próximas e Islas Canarias

Recovery and processing of aeromagnetic survey data of the Iberian Peninsula, its surrounding maritime areas and the Canary Islands

NÚÑEZ, Alberto ⁽¹⁾; PINTOR, Pablo ⁽¹⁾; TORDESILLAS, José Manuel ⁽²⁾

⁽¹⁾ Área de Geomagnetismo, Instituto Geográfico Nacional, Madrid, España.

⁽²⁾ Área de Geomagnetismo, Instituto Geográfico Nacional, Observatorio Geofísico de Toledo, Toledo, España.

Autor correspondiente: anmurillo@transportes.gob.es

SUMMARY

The Geomagnetism Area of the Instituto Geográfico Nacional (IGN) from Spain has recently completed a program of recovery and compilation of digital data from most of the aeromagnetic surveys conducted by several institutions in the Iberian Peninsula and its surrounding maritime areas between 1974 and 2005. Using this data, a continuous cartography of magnetic Total Field (F) anomalies of this region has been produced at 1:2,250,000 scale. With this purpose, a grid of points with anomaly values at a fixed height of 3000 meters above sea level was generated. Then, this grid was interpolated and smoothed using ArcGIS software. In this particular way, a very detailed map of magnetic anomalies including, apart from the Iberian Peninsula, the Alboran Sea, the Gulf of Cádiz and the western Iberian Continental Platform was obtained.

Furthermore, data of F anomaly from the Canary Islands aeromagnetic survey, which had been used by the IGN for its 1993 Mapa de Anomalías Magnéticas de Canarias (Map of Magnetic Anomalies of the Canary Islands), have now been reused with the goal of updating and improving the visualization of its thematic information by means of modern techniques of GIS. Consequently, a new general map of the Canary Islands at 1:2,250,000 scale has been prepared, along with a specific map for each island at 1:200,000 scale. These maps show F anomalies at 3200 meters above sea level and allow the observation of the strong anomaly gradients in these regions with high accuracy.

PALABRAS CLAVE

Geomagnetismo, Anomalías Magnéticas, Cartografía Geomagnética, Aeromagnetismo, Levantamiento aeromagnético, Península Ibérica, Islas Baleares, Portugal, España.

PRESENTACIÓN

El Área de Geomagnetismo del Instituto Geográfico Nacional (IGN) está realizando la recuperación y recopilación de los datos digitales correspondientes a los levantamientos aeromagnéticos realizados por distintas instituciones en el periodo comprendido entre 1974 y 2005 en la Península Ibérica y sus zonas marítimas próximas, así como en las Islas Canarias. El objetivo general de este trabajo es, por un lado, retomar el estudio de las anomalías magnéticas por parte del Área de Geomagnetismo, con la motivación de localizar los valores de mayor interés que alcanza la anomalía de la componente magnética Campo Total (F) en ambas regiones y aplicar este conocimiento en futuros trabajos, y, por otro lado, revisar y mejorar la cartografía aeromagnética publicada aprovechando el avance en los sistemas informáticos cartográficos y de tratamiento de datos. Esta cartografía actualizada puede emplearse en la profundización del conocimiento de las variaciones espaciales del campo geomagnético interno cortical.

METODOLOGÍA DE REALIZACIÓN DEL MAPA DE ANOMALÍAS MAGNÉTICAS DE LA PENÍNSULA IBÉRICA Y SU ENTORNO

El archivo digital de aeromagnetismo del Área de Geomagnetismo del IGN se remonta a los primeros mapas elaborados con sistemas informáticos en la década de 1980. Contiene los ficheros correspondientes a cinco levantamientos realizados en la Península Ibérica y zonas marítimas próximas, tal como se muestra en la Figura 1:

1. España Peninsular (Ardizzone et al., 1989)

2. Portugal Continental (Miranda, 1989)
3. Mar de Alborán (Galdeano, 1980)
4. Golfo de Cádiz (Socías, 2007)
5. Margen Continental (Silva et al., 2000).

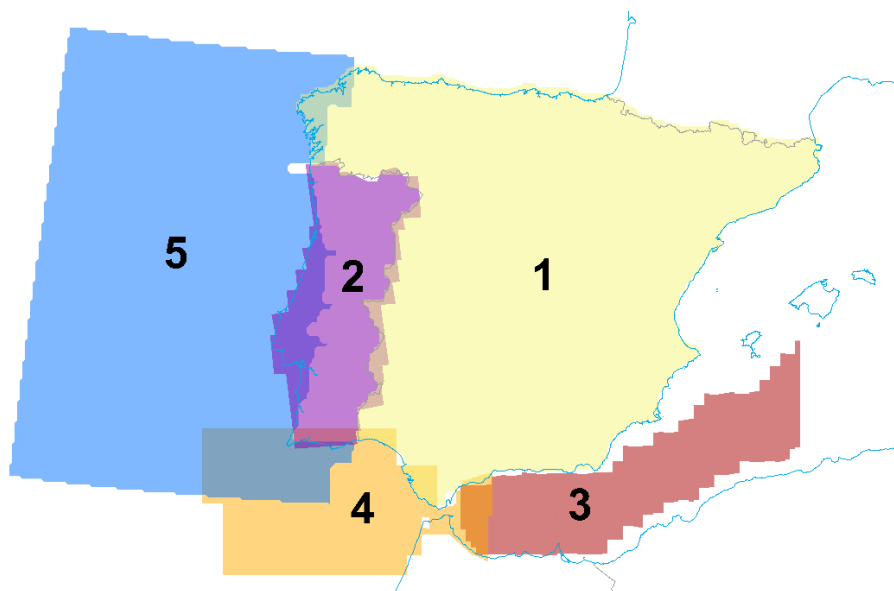


Figura 1: Relación de levantamientos aeromagnéticos utilizados en la realización del Mapa de Anomalías Magnéticas de la Península Ibérica y su Entorno.

Con el fin de estudiar la anomalía de F en la región ibérica, los valores obtenidos en los distintos vuelos fueron prolongados a la altitud común de 3000 m, coincidente con la del levantamiento de España Peninsular. En el presente trabajo se han recopilado e inventariado los ficheros del archivo digital correspondientes a los levantamientos citados. Las tareas de inventario han consistido, fundamentalmente, en la comprobación del tipo de dato de cada fichero (componente F o anomalía de esta componente) y las unidades (metros o kilómetros) de las coordenadas cartesianas X e Y (en diversos sistemas de proyección y sistemas geodésicos de referencia) de los puntos del fichero, donde se localiza el dato. Con la información relativa a esta recopilación e inventario se ha procedido a hacer el siguiente proceso:

- Actualización de los ficheros a las técnicas actuales de visualización y representación en entorno SIG, por medio de la conversión de los mismos a nuevos formatos compatibles con el software moderno (ArcGIS y QGIS).
- Comprobación de la altitud de referencia de los datos de cada uno de los levantamientos aeromagnéticos, revisando las memorias de los mismos y artículos relacionados disponibles, y de manera comparativa utilizando las áreas de solape entre varios levantamientos cuando no se contaba con los metadatos de los vuelos.
- Localización de los valores de anomalía prolongados a 3000 metros de altitud y generación de una malla continua de puntos a partir de los mismos.

En el caso de los levantamientos de España Peninsular y Portugal Continental, los autores de este trabajo han podido determinar los ficheros de malla con valores de anomalía con altitud de referencia 3000 metros mediante la representación de las correspondientes isólinas y regiones de anomalía con los mismos criterios cartográficos empleados en los correspondientes mapas de anomalías publicados, que están referidos a 3000 m. La similitud del resultado de esta representación con estos mapas ha permitido certificar la altitud de referencia de los citados ficheros de malla. Los criterios cartográficos empleados han sido fundamentalmente el intervalo de isólinas y el rango total de valores representados.

En el caso de los levantamientos de Mar de Alborán, Golfo de Cádiz y Margen Continental, los autores constatan la escasez de documentación publicada con referencias explícitas a la prolongación de los valores de anomalía a la altitud de referencia 3000

metros, y han encontrado dificultad para encontrar un documento de referencia para poder contrastar la información de los ficheros. En este contexto, se ha optado por la comparación directa de los valores de anomalía en las áreas de solape de los levantamientos con los valores ya prolongados de España Peninsular y Portugal Continental. Esta operación ha permitido inventariar, para cada uno de los tres levantamientos, los ficheros de anomalía con altitud 3000 metros que constaban en el archivo digital de aeromagnetismo.

- Interpolación por vecino natural con el software ArcGIS a partir de los puntos de la malla obtenida (Figura 2). Esta interpolación se utiliza posteriormente para obtener los contornos de anomalía.

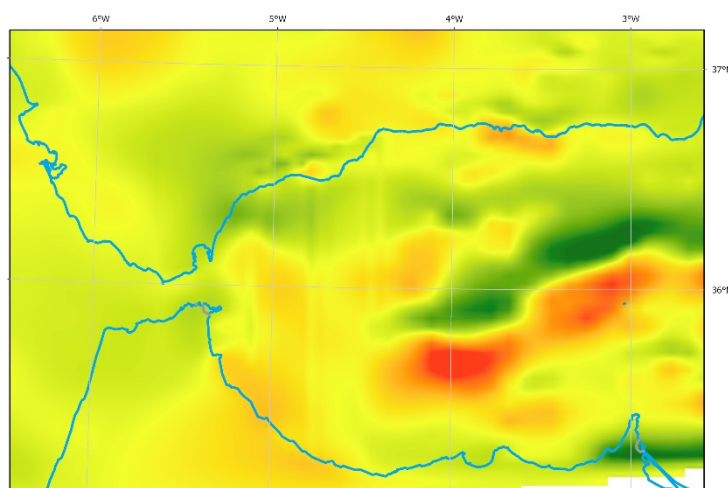


Figura 2: Detalle de la interpolación por vecino natural de los datos de anomalía. Vista del Estrecho de Gibraltar y el Mar de Alborán.

- Extracción de las isolinéas de anomalía magnética (isoanómalas) del ráster interpolado (Figura 3), suavizado de las zonas más abruptas y desarrollo del diseño final del mapa, utilizando la escala 1:2.250.000.

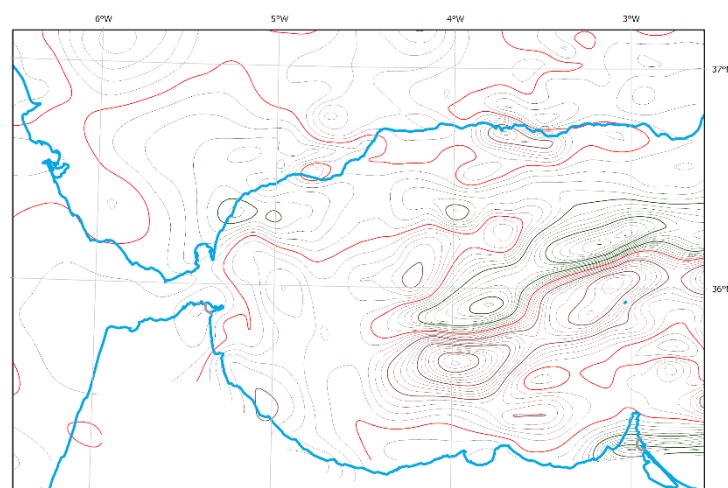


Figura 3: Detalle de las isoanómalas extraídas a partir del ráster interpolado. Vista del Estrecho de Gibraltar y el Mar de Alborán.

METODOLOGÍA DE REALIZACIÓN DE LOS MAPAS DE ANOMALÍAS DE CANARIAS

El trabajo de elaboración del mapa de anomalías de las Islas Canarias sigue el mismo flujo de trabajo del mapa peninsular, con dos diferencias principales: en lugar de crear una malla de puntos nueva se ha reutilizado una preexistente y el intervalo de isolinéas se ha modificado para generar mapas específicos para cada isla o conjunto de islas.

De este modo, el proceso es el siguiente:

- Reutilización de una malla de puntos con valor de anomalía de F prolongado a la altitud común de 3200 m, que procede

del levantamiento realizado por el IGN en 1993. Estos valores fueron utilizados en la producción del Mapa de Anomalías Magnéticas de Canarias (Socías y Mezcua, 1996).

- En entorno SIG, interpolación de los valores de la malla por el método de vecino natural. Posteriormente, extracción de las isoanómalas con el mismo intervalo del mapa original (10 nT).
- Diseño final del mapa a escala 1:2.250.000, y ajuste de la gama de colores en las regiones encerradas por las isoanómalas para una mejor visualización de los intervalos de anomalía.
- Generación de mapas específicos para las islas de Fuerteventura, Gran Canaria, Lanzarote, La Palma, Tenerife, y el conjunto de La Gomera y El Hierro, a escala 1:200.000. Para estos mapas, se ha escogido un intervalo de isoanómalas superior (50 nT), con el fin de observar con mayor precisión los fuertes gradientes de anomalía presentes en cada isla.

RESULTADOS

Con este trabajo, además de haber conseguido actualizar y completar el archivo digital del Área de Geomagnetismo, ha sido posible realizar el Mapa de Anomalías Magnéticas del Conjunto de los Levantamientos de la Península Ibérica y su Entorno (Figura 4), el Mapa de Anomalías Magnéticas de las Islas Canarias (Figura 6) y el Mapa de Anomalías de Tenerife (Figura 8), que se presentan a continuación. Por exigencias del formato del artículo se encuentran a un tamaño reducido respecto al original. Estas mismas exigencias no permiten mostrar los mapas de anomalías realizados para las restantes islas del archipiélago canario, que también constituyen parte de los resultados de este trabajo.

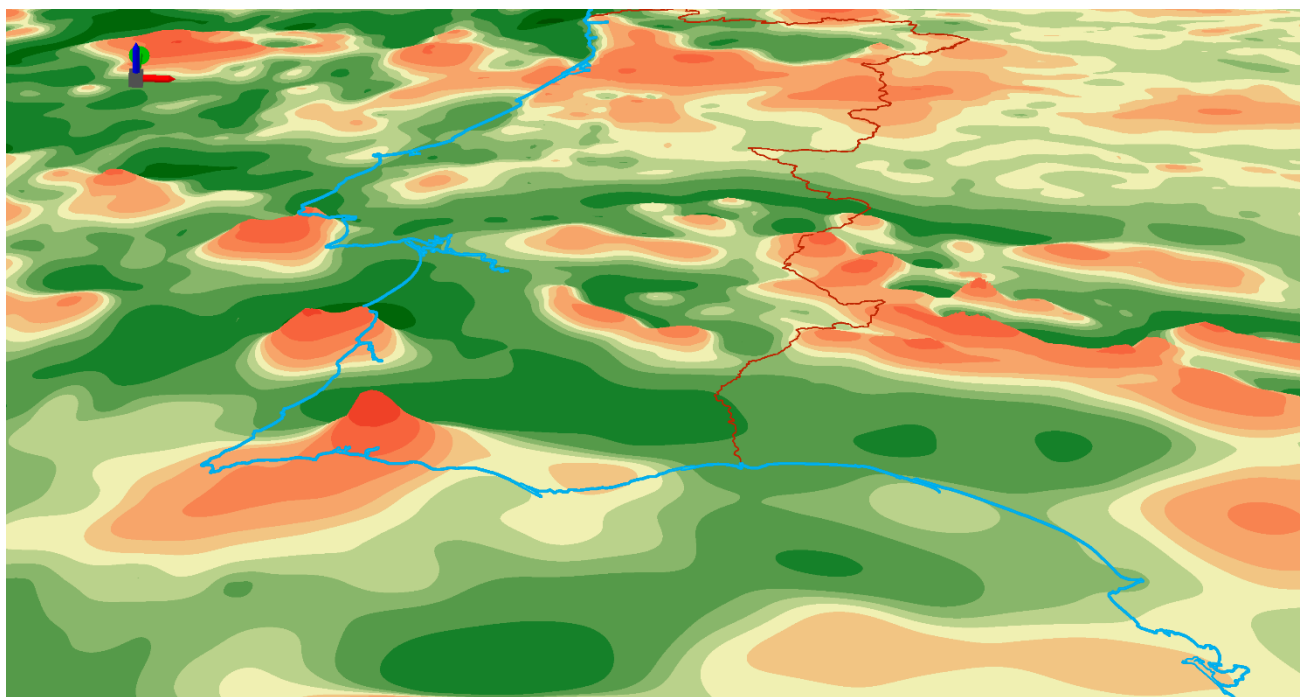
Además, para ilustrar mejor los gradientes de anomalía presentamos aquí figuras que contienen una vista tridimensional de ciertas regiones de especial interés y que potencialmente podrían añadirse a la futura publicación de esta cartografía (Figura 5 para la zona peninsular y Figura 7 para las Islas Canarias).

Es importante destacar la mejora realizada en el mapa de anomalías de las Islas Canarias respecto a la publicación de 1993 (Figura 9). En la nueva cartografía se ha decidido cambiar la escala de colores rojos a violetas, manteniéndose la rampa de azules. De este modo se actualiza el gradiente de colores tradicionalmente usado en los mapas de anomalías manteniendo el azul como el color negativo pero usando un color más suave que el rojo para los valores positivos, mejorando estéticamente el resultado. Otro cambio se ha realizado en las isoanómalas: mientras que en el mapa de 1993 no se diferencia entre las positivas y negativas, en el presente trabajo se asignan tres colores diferentes: azul para las negativas, verdes para la isoanómala cero y morado para las positivas.

Por otro lado, para mejorar la legibilidad del mapa se ha eliminado la toponimia, ya que en un mapa con gradientes tan pronunciados producía empastes con las isolíneas.



1:2.250.000).



en color rojo.

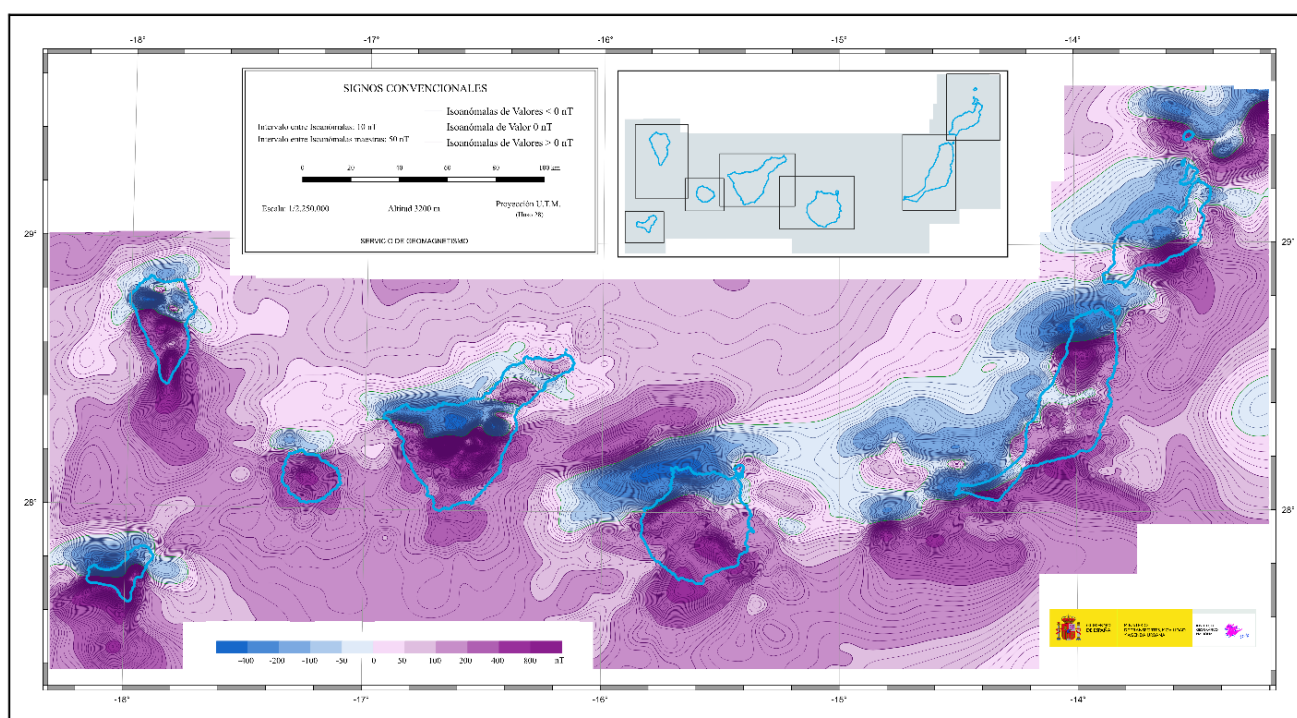


Figura 6: Mapa de Anomalias Magnéticas de las Islas Canarias (escala original 1:2.250.000).

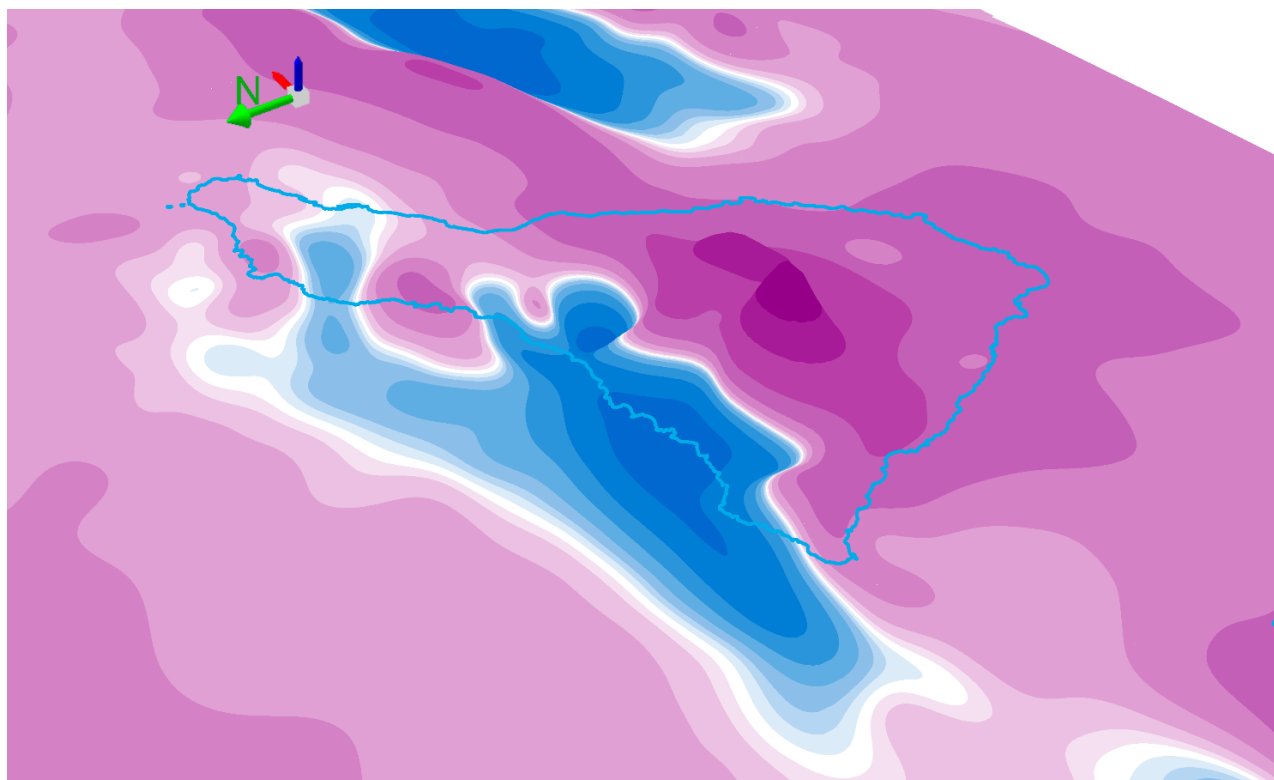


Figura 7: Vista tridimensional del mapa de anomalías de la Isla de Tenerife.

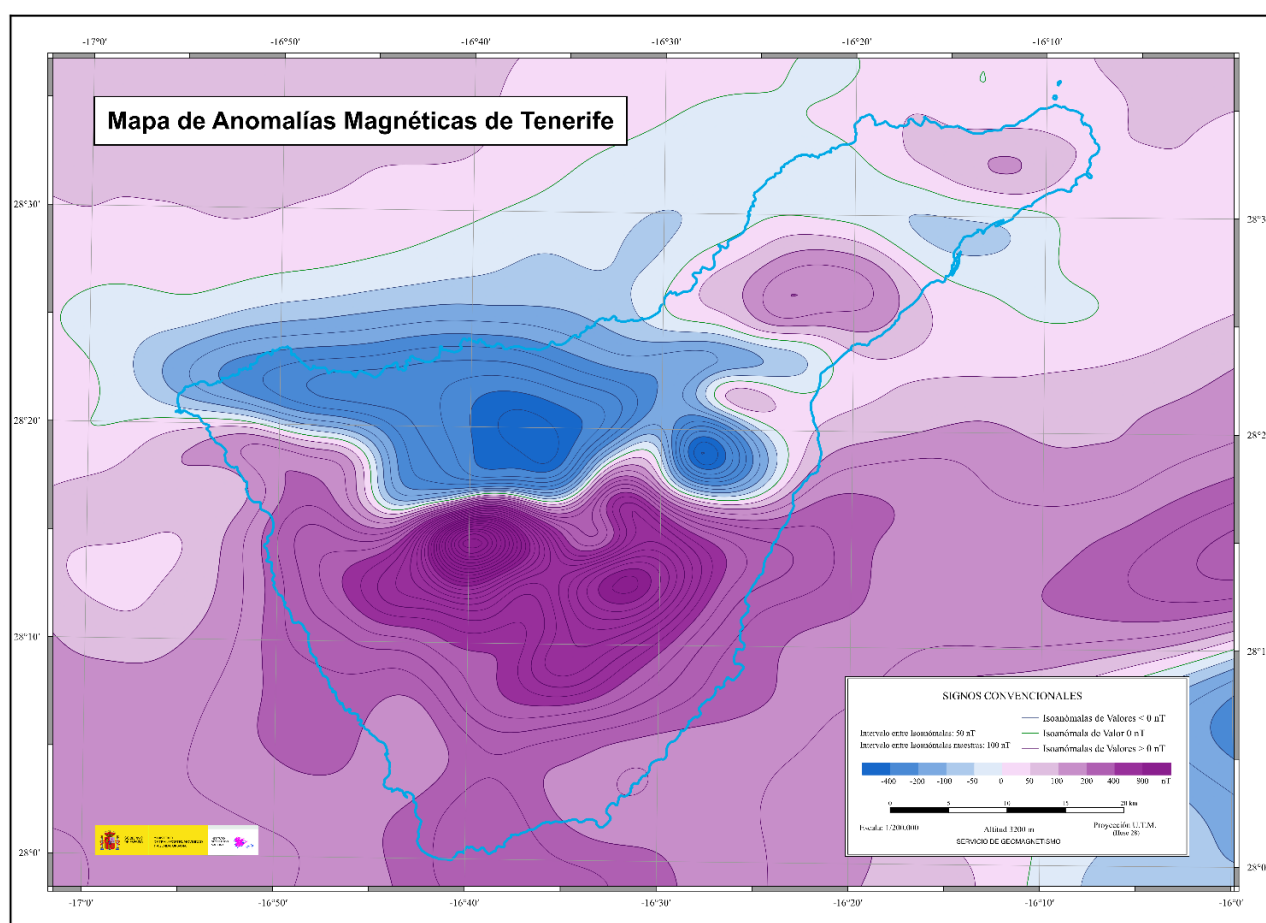


Figura 8: Mapa de Anomalías Magnéticas de Tenerife (escala original 1:200.000).

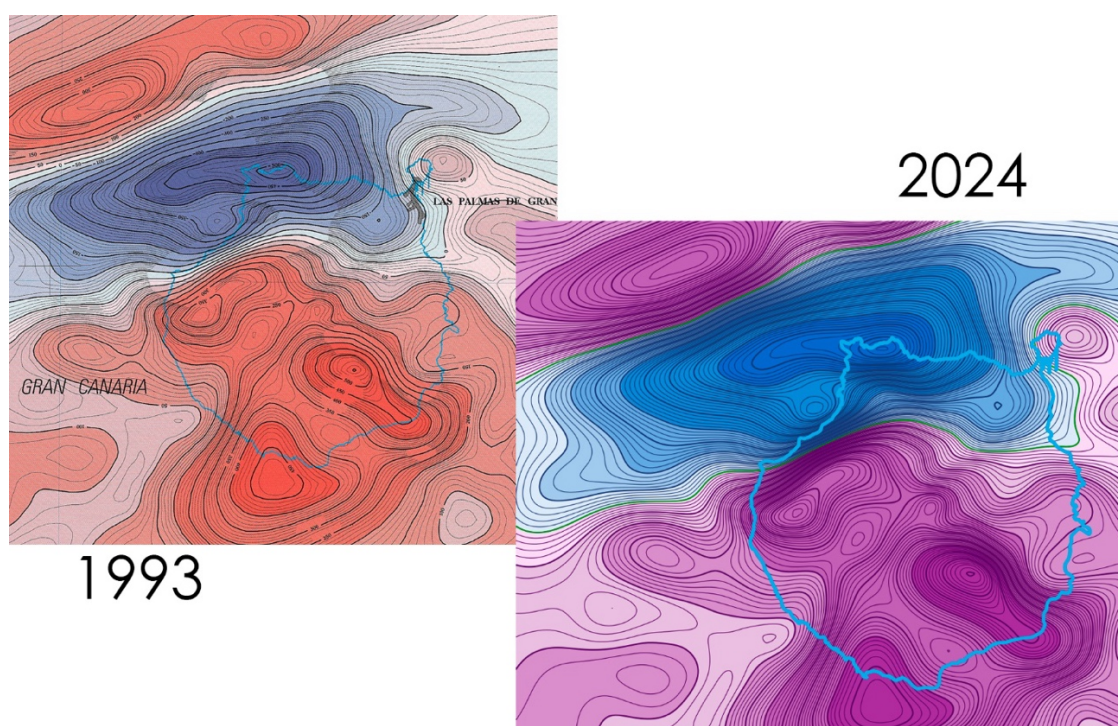


Figura 9: Comparación entre el Mapa de Anomalías de Canarias de 1993 y el que se presenta en este artículo. Detalle de ambas publicaciones para la Isla de Gran Canaria.

TRABAJOS FUTUROS

Como siguiente etapa, se plantean varias líneas de trabajo:

- Prolongación a la altitud de referencia de 3000 m de los datos de anomalía de F correspondientes a otros levantamientos realizados en las zonas marítimas próximas a la Península Ibérica, como el levantamiento del Golfo de Valencia (Galdeano, 1980), e incorporación de los valores prolongados al proceso de elaboración del Mapa de Anomalías Magnéticas de la Península Ibérica y su entorno.
- Incorporación de las variaciones espaciales del campo interno cortical en la Península y las Islas Baleares en la modelización del campo interno completo, realizada periódicamente por el IGN con el fin de producir la cartografía geomagnética oficial. En particular, se pretende utilizar el Mapa de Anomalías Magnéticas de la Península Ibérica y su entorno para obtener el valor del campo cortical en una serie de estaciones de mapa distribuidas en el territorio. En estas estaciones, el IGN obtiene de forma matemática el valor del campo cortical, a partir del modelado del campo interno principal y de las observaciones del campo interno completo realizadas en cada estación, y, posteriormente, emplea este valor en el cálculo del campo completo en fecha determinada. Por tanto, la presente línea de trabajo propone comparar el valor de campo cortical proporcionado por la cartografía de anomalías y el valor de campo cortical obtenido matemáticamente en cada estación, con el fin de valorar la utilización del campo cortical proporcionado por el mapa de anomalías en la determinación del campo completo en las estaciones de mapa en una determinada fecha de referencia.
- Utilización del Mapa de Anomalías Magnéticas de la Península Ibérica y su entorno para la evaluación de los valores del campo completo modelizados en las estaciones de mapa, con el fin de valorar su utilización en la producción de la cartografía geomagnética oficial de la Península Ibérica y las Islas Baleares, por parte del IGN. La utilización del mapa de anomalías permitirá localizar aquellos valores modelizados del campo completo que, al ser interpolados sobre el territorio, den lugar a valores máximos y mínimos locales sin correspondencia alguna con anomalías magnéticas significativas. Estos valores podrán entonces ser identificados como claros artificios matemáticos, y ser descartados del proceso de producción de la cartografía geomagnética de Iberia y Baleares.
- Revisión de la interpretación de los levantamientos aeromagnéticos analizados en el presente estudio, en cuanto a la identificación de los rasgos estructurales de los entornos de la Península Ibérica y las Islas Canarias.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Sonsoles Pérez Cañas (Subdirección General de Cartografía y Ordenación del Territorio, Instituto Geográfico Nacional) su contribución en la realización del presente trabajo.

REFERENCIAS

- [1] Ardizzone, A.; Mezcuá, J. y Socías, I. (1989): "Mapa aeromagnético de España Peninsular". Dirección General del Instituto Geográfico Nacional.
- [2] Galdeano, A. (1980): "La cartographie aeromagnetique de soud-ouest de l'Europe et de la region Afar". Tesis Doctoral, Universidad de Pierre et Marie Curie.
- [3] Miranda, J. M. (1989): "O levantamento aeromagnetico de Portugal". Tesis Doctoral, Universidad de Lisboa.
- [4] Silva, E. A.; Miranda, J. M.; Luis, J. F. y Galdeano, A. (2000): "Correlation between the Palaeozoic structures from West Iberian and Grand Banks margins using inversion of magnetic anomalies". *Tectonophysics*, 321 (1), 57-71.
- [5] Socías, I. (2007): "Levantamiento aeromagnético del Golfo de Cádiz". Dirección General del Instituto Geográfico Nacional.
- [6] Socías, I. y Mezcuá, J. (1996): "Levantamiento Aeromagnético del Archipiélago Canario". Publicación Técnica núm. 35, Dirección General del Instituto Geográfico Nacional.

Estudio sobre efectos en la ionosfera de la erupción del volcán Tonga del 15 de enero de 2022

Study of the effects on the ionosphere of the Tonga volcano eruption on January 15, 2022

RODRIGUEZ-DÍAZ, Sara⁽¹⁾; CAMPUZANO, Saioa A.^(1,2,3); MIGOYA-ORUÉ, Yenca⁽⁴⁾; RADICELLA, Sandro M.^(1,5); RODRIGUEZ-CADEROT, Gracia⁽¹⁾; HERRAIZ-SARACHAGA, Miguel⁽¹⁾⁽⁶⁾

⁽¹⁾ Departamento de Física de la Tierra y Astrofísica. Facultad de Físicas. UCM

⁽²⁾ Institute of Geosciences IGEO (CSIC, UCM), Spanish National Research Council, Madrid, Spain.

⁽³⁾ Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), Rome, Italy.

⁽⁴⁾ The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics (ICTP), Trieste, Italy.

⁽⁵⁾ Institute for Scientific Research, Boston College, Chestnut Hill, USA.

⁽⁶⁾ Instituto de Matemática Interdisciplinar, Facultad de Matemáticas, UCM.

Autor correspondiente: sarrod23@ucm.es

SUMMARY

The influence on the ionosphere of very energetic atmospheric and crustal phenomena, such as hurricanes, earthquakes, tsunamis and volcanic eruptions, is an important topic with a relevant geophysical interest, as demonstrated by many studies. This bottom-up contribution to ionospheric dynamics reinforces the top-down effects analyzed since the first steps of Aeronomy and increases their practical interest. This work presents several effects on the ionosphere caused by the giant volcanic explosion that took place on the island of Tonga (20.54°S, 175.38°W) on 15 January 2022. This extraordinary event triggered a tsunami and generated many atmospheric phenomena around the world. Our work deals with the effects of both the eruption and the tsunami on the ionosphere in the wide area of Tonga Island and the South American Pacific coast. To this end, the Total Electron Content of the ionosphere is analyzed using data from the Swarm constellation, GNSS stations and ionosondes placed close to the eruption zone. The results show the influence of both phenomena on the study area.

PALABRAS CLAVE

Ionosphere, Total Electron Content (TEC), volcanic eruption, tsunamis, Tonga.

INTRODUCCIÓN

Desde la segunda mitad del siglo XX, el estudio de la Tierra se amplió para incluir la superficie líquida, la atmósfera y el geoespacio, con un énfasis en la influencia del Sol en los procesos geofísicos. Este enfoque integrador permitió explorar las interacciones entre diferentes áreas de estudio y el impacto de fenómenos energéticos en distintos ámbitos.

En el caso de la Tierra sólida, se identificó por primera vez la influencia de los terremotos en la ionosfera tras el terremoto de Alaska de 1964. Sismogramas en Berkeley y ionogramas en Denver mostraron desplazamientos verticales anómalos en la ionosfera, revelando una relación causa-efecto entre ambos fenómenos (Bolt, 1964; Davies & Baker, 1965). Posteriormente, numerosos estudios han confirmado que grandes terremotos pueden afectar la ionosfera a través de ondas acústicas y gravitatorias generadas por la ruptura sísmica (Calais & Minster, 1995; Pulinets, 2004; Pulinets & Ouzounov, 2011). También se ha observado que terremotos de magnitud moderada pueden tener efectos similares (Sanchez-Dulcet et al., 2015; Perrone et al., 2018).

La capacidad de los tsunamis para generar efectos en la ionosfera fue teorizada por Daniels (1952), Hines (1972) y Peltier y Hines (1976), y confirmada empíricamente para el terremoto de Perú de 2001 mediante análisis del Contenido Total de Electrones (TEC) (Artru et al., 2005). Estudios recientes han corroborado estas observaciones para eventos como los terremotos de Indonesia (2004), Kuriles (2006), Chile (2010, 2015) y Tohoku (2011), confirmando que la ionosfera puede verse alterada por terremotos, tsunamis y erupciones volcánicas de alta energía (Cahyadi et al., 2024).

Estos fenómenos generan ondas acústicas y de gravedad que se propagan hacia la ionosfera, perturbando su estructura y composición. Las ondas acústicas, con velocidades que aumentan a medida que ascienden, tardan unos 8-9 minutos en llegar a

la ionosfera, mientras que las ondas de gravedad con propagación vertical oblicua tardan aproximadamente 50 minutos. La propagación de estas ondas causa perturbaciones en la ionosfera observables mediante receptores GNSS, ionosondas y satélites de baja órbita, proporcionando valiosos datos sobre la estructura y variabilidad de la ionosfera (Astafyeva, 2019; He et al., 2023; Moges et al., 2024).

En este trabajo se analiza un caso específico en el que un fenómeno cortical, la erupción de Hunga Tonga-Hunga Ha'apai (HTHH) el 15 de enero de 2022, afectó significativamente la ionosfera. La erupción, una de las más explosivas recientes, generó una columna de cenizas de 58 km de altura y tsunamis locales. Se observaron pequeñas olas globales, posiblemente causadas por una onda de presión de aire, y olas más grandes cercanas al volcán, probablemente debido al desplazamiento masivo de agua en la fuente del tsunami (Carvajal et al., 2022; Terry et al., 2022). La erupción causó perturbaciones en la ionosfera, atmósfera, océano y tierra sólida (Fujii & Satake, 2024). Estas perturbaciones en la ionosfera y perturbaciones ionosféricas itinerantes o TIDs (por sus siglas en inglés, *Travelling Ionospheric Disturbances*), fueron detectadas en las proximidades del volcán y hasta 6,000 km de distancia. La actividad magnética durante este periodo fue alta, y el rango de tiempo de nuestro estudio (entre el 13 y el 17 de enero de 2022) coincidió con la fase de recuperación de una tormenta geomagnética. La tormenta comenzó el 14 de enero y su recuperación se inició a partir del día 15.

En el presente estudio se han investigado las perturbaciones ionosféricas causadas por el tsunami generado por la erupción, con un énfasis en su propagación hacia el este, un aspecto que ha sido poco estudiado. Se han realizado análisis detallados del TEC utilizando datos de sistemas GNSS y la constelación de satélites Swarm de la Agencia Espacial Europea, complementados con ionogramas obtenidos con ionosondas. Este estudio busca aportar una nueva perspectiva sobre cómo las variaciones en la ionosfera causadas por fenómenos como los tsunamis, pueden afectar los sistemas de radiocomunicaciones y navegación satelital, destacando la importancia de un monitoreo exhaustivo y continuo de estos fenómenos.

DATOS Y METODOLOGÍA

El análisis de la ionosfera se realizó mediante el estudio de observaciones del TEC usando datos de siete estaciones GNSS, mediciones del satélite Alpha de la constelación Swarm y observaciones de ionogramas de dos ionosondas localizadas al este y al oeste del área de Tonga. Los parámetros utilizados en el estudio del TEC incluyeron $vTEC$, $sTEC$, ROT y $ROTI$ para detectar irregularidades asociadas al evento de la erupción del volcán HTHH y el tsunami resultante.

El TEC es un parámetro de gran utilidad para representar y analizar el comportamiento de la ionosfera y, por ello, ha sido utilizado en el presente trabajo. Definimos el TEC como la integral de la densidad de electrones a lo largo de un trayecto entre dos puntos, es decir, el número de electrones contenidos en un cilindro de base unidad entre el receptor (la estación GNSS en tierra) y el emisor (el satélite). La unidad del TEC es el TECU, equivalente a 10^{16} electrones/m².

En el intercambio de señales electromagnéticas entre estación en tierra y satélite, se produce un retraso en la propagación de la onda a través de la ionosfera mediante el cual se puede determinar el TEC. Se definen dos tipos de TEC en función de si la columna de referencia entre el emisor y el receptor GNSS es vertical u oblicua: $vTEC$ y $sTEC$. El $vTEC$ (vertical-TEC) se calcula en la vertical desde la superficie terrestre hasta cierta altura en la ionosfera dependiente del modelo elegido, mientras que el $sTEC$ (slant-TEC) se calcula en la línea de visión desde el satélite hasta el receptor.

Para evaluar las irregularidades ionosféricas en este trabajo, hemos analizado el $vTEC$ y la variación del $sTEC$ en un intervalo de tiempo de 30 segundos. Esta variación del $sTEC$ es conocida como tasa de TEC (Rate of change of TEC, ROT). Se mide en TECU/min y viene definida por la siguiente expresión (1) para un instante " i ":

$$ROT_i = \frac{sTEC_{i+1} - sTEC_i}{t_{i+1} - t_i} \quad (1)$$

El ROT puede variar con valores pequeños, lo que indica que existen regiones con irregularidades que en comparación con el gradiente de TEC tienen menor escala (Pi et al., 1997). Para poder identificar y presentar estadísticamente estas irregularidades se define el índice de la tasa de TEC (Rate of change of TEC index, $ROTI$), basado en la desviación estándar del ROT . El $ROTI$ viene definido por la ecuación (2):

$$ROTI = \sqrt{\langle ROT^2 \rangle - \langle ROT \rangle^2} \quad (2)$$

Datos de las estaciones GNSS.

En este trabajo, se han procesado y calibrado datos de observaciones durante 24h cada 30 segundos para los días 13 al 17 de enero de 2022. Se adquirieron archivos RINEX de receptores GNSS de redes globales. De trece estaciones analizadas, se seleccionaron siete por su localización y calidad de datos. Los archivos RINEX fueron descomprimidos y convertidos a su versión 2.11.

Posteriormente, se utilizaron programas para obtener valores del TEC usando el ejecutable GNSS VShell desarrollado por el Dr. Luigi Ciruolo del Instituto di Fisica Applicata "Carrara" del Consiglio Nazionale delle Ricerche en Florencia, Italia, que calibró los datos según parámetros específicos como el ángulo mínimo de elevación del satélite (en este caso utilizamos 30°) y la altitud de la capa ionosférica (350 km).

Con programas de Matlab, se calcularon y representaron el ROT y el ROTI por horas para las estaciones GNSS, analizando los resultados para detectar efectos del tsunami en la ionosfera. También se obtuvieron datos de vTEC para compararlos con las observaciones del satélite Swarm.

Datos satelitales de la constelación Swarm.

La constelación de satélites Swarm es una misión de la Agencia Espacial Europea para la observación del campo magnético de la Tierra y su evolución temporal, así como la del campo eléctrico en la atmósfera. Para ello utiliza una constelación de tres satélites (Alpha, Bravo y Charlie) que poseen magnetómetros muy sofisticados y otros instrumentos. Para la obtención de datos de la constelación de satélites Swarm, se ha accedido a la página web de la ESA, a través de la cual se han descargado datos ionosféricos L2-TEC de TEC vertical. El L2-TEC es un producto, es decir, un nivel específico de procesamiento de los datos que proporcionan la densidad electrónica integrada a lo largo de la línea de visión desde Swarm hasta los satélites GPS. Se produce un archivo de datos de L2-TEC por día y por satélite Swarm (Alpha, Bravo o Charlie).

Los datos extraídos para este estudio son los registrados en el rango de tiempo de diciembre de 2021 y enero de 2022 para el satélite Alpha, con el fin de poder observar las variaciones de vTEC absoluto antes, durante y después de la erupción y el tsunami. Los datos de vTEC se obtuvieron considerando ángulos de elevación de satélites GPS de al menos 50 grados para asegurar la precisión. Para analizar estos datos se representaron las variaciones diarias de vTEC en mapas, indicando en todos ellos los índices geomagnéticos Dst y ap máximos (en valor absoluto) de ese día, los cuales fueron obtenidos del servicio de datos WDC Kyoto, para monitorizar la actividad geomagnética.

Datos de ionosondas.

Para examinar en detalle las perturbaciones en la ionosfera causadas por la erupción volcánica en Tonga y el posterior tsunami, se han comparado ionogramas de diversas estaciones cercanas al área del evento. Este análisis se llevó a cabo utilizando los datos de las ionosondas de Niue y Norfolk Island, en el Pacífico Sur (Figura 4). La información se ha obtenido de la página web del Australian Space Weather Forecasting Centre, donde se visualizan ionogramas cada 5 minutos, localizados en Australia y sus inmediaciones. También se ha accedido a la página web de GIRO (por sus siglas en inglés *Global Ionosphere Radio Observatory*), el centro de datos ionosféricos de la Universidad de Lowell (Massachusetts, Estados Unidos) en el que se recopilan ionogramas de una red mundial de ionosondas cada 5 minutos. Se buscó también información de las ionosondas ubicadas en Jicamarca y Tucumán, en América del Sur, porque sus datos podrían haber enriquecido este estudio con información relevante acerca de la influencia del tsunami en su propagación hacia el este, pero no se disponía de registros de estas estaciones para la fecha de interés.

El objetivo del análisis de los ionogramas ha sido determinar las frecuencias críticas de la capa F2 de la ionosfera con el fin de establecer las diferencias de densidad electrónica entre los días 14 (día previo a la erupción) y 15. Para ello, se ha utilizado la fórmula 3:

$$\sqrt{Nm(F2)} = \frac{foF2}{9}, \quad (3)$$

donde foF2 es la frecuencia crítica, es decir, la frecuencia máxima para la que se puede recibir un pulso refractado en la capa F2, y Nm(F2) es la densidad electrónica máxima de la capa F2. Las unidades de foF2 son MHz y la densidad N viene dada en electrones/m³.

RESULTADOS

Los resultados de este trabajo ponen de manifiesto la posible influencia del tsunami generado por la erupción del volcán HTHH el 15 de enero de 2022 en la ionosfera, teniendo en cuenta que la tormenta geomagnética que tuvo lugar el día 14 también pudo generar perturbaciones. Los resultados de las estaciones GNSS son los más representativos y los que dan información principal sobre estos efectos. Los datos de Swarm y los ionogramas nos aportan una información complementaria para las interpretaciones de las irregularidades producidas en la ionosfera.

ROTI de estaciones GNSS.

Se ha estudiado el ROTI en las estaciones GNSS seleccionadas. Se observaron irregularidades asociables al tsunami en las estaciones más cercanas al volcán (Figura 1). El día 14, día previo a la erupción, se detectó un aumento de ROTI en las estaciones AREG e IQQE, coincidiendo con el inicio de una tormenta geomagnética. El día 15 de enero, los efectos de la erupción y el tsunami fueron más evidentes en la estación TONG, la más cercana al volcán HTHH. Asimismo, se observaron incrementos de ROTI en las estaciones CKIS, GAMB, AREG y IQQE, lo que sugiere una posible influencia del tsunami en estas ubicaciones.

A partir del mapa de la figura 1 de tiempos de viaje predichos de las olas del tsunami provocadas por la erupción, se correlacionaron las horas estimadas de llegada del tsunami con los aumentos de ROTI en las estaciones.

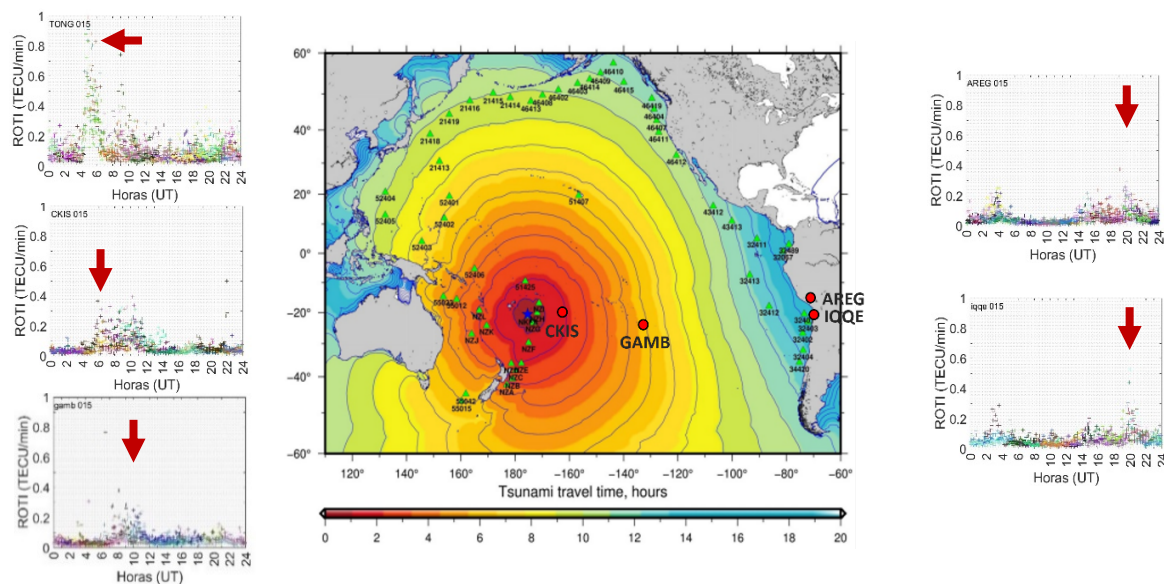


Figura 1: Mapa modificado del *United States Geological Survey* (USGS) de tiempos de viaje del tsunami y gráficos de ROTI por horas (TECU/min) en el día 15 de enero de 2022. Las flechas rojas señalan los aumentos de ROTI en cada estación.

Las irregularidades detectadas en las estaciones GNSS de CKIS y GAMB, las estaciones más próximas al volcán después de TONG (1619.46 km y 4168.04 km, respectivamente), parecen estar asociadas al tsunami.

La estimación de tiempos de llegada basada en el mapa de la figura 1 sugiere que la ola del tsunami podría haber llegado a CKIS en aproximadamente 2 horas. Teniendo en cuenta que la hora de inicio de la erupción fue a las 4:14:45 UTC (Carvajal et al., 2022), la hora de llegada del tsunami a dicha estación sería a partir de las 6 UTC, lo que es coherente con lo observado en el aumento de ROTI a esta hora. Además, para validar las irregularidades ionosféricas observadas, también se ha comparado el tiempo de llegada del tsunami estimado por Carvajal et al. (2022) con nuestros datos. Según estos autores, las perturbaciones ionosféricas que podrían estar asociadas a las olas grandes llegarían a IQQE y AREG alrededor de las 22:00 UTC, mientras que nuestras observaciones muestran un incremento predominante de ROTI a las 20:00 UTC, lo que pone en duda la correlación directa en estas estaciones. El efecto parece menos claro y debe ser considerado con cautela. Las discrepancias en los tiempos de llegada y las magnitudes de las irregularidades sugieren que otros factores podrían estar influyendo en estas estaciones.

Es importante destacar que lo observado en la estación de TONG, localizada a 68.32 km del volcán HTHH, está directamente relacionado con el inicio del tsunami. El aumento significativo de los valores de ROTI en esta estación se observa poco después

del inicio de la erupción, alcanzando valores mucho más altos que en el resto de las estaciones. Además, para GAMB, a partir de los tiempos de viaje proporcionados en el estudio de Carvajal et al. (2022) se determina que el tiempo que tarda en llegar el tsunami a esta estación es aproximadamente 6 horas, lo que concuerda con el aumento de ROTI observado a las 10:00 UTC, 6 horas después de la erupción y el tsunami. Las irregularidades ionosféricas evidentes en TONG, CKIS y GAMB podrían dar una indicación de la extensión del efecto en función de la distancia en sentido oeste-este.

TEC de estaciones GNSS y satélites Swarm.

Se ha realizado una comparación de los datos de vTEC derivados del satélite Alpha a su paso por el Pacífico Sur y de los de las estaciones GNSS donde se observan irregularidades asociadas al tsunami. En la figura 2 se muestra un ejemplo de la trayectoria norte-sur del satélite Alpha a lo largo del día 15 de enero del 2022 sobre el área de interés. Además, se indica la hora UTC media de cada traza que describió el satélite en su órbita. Por otro lado, la figura 3 muestra los datos de vTEC analizados para cada estación GNSS. A diferencia de las observaciones en las estaciones GNSS que mostraron irregularidades claramente asociadas al tsunami, no se observaron cambios significativos en los datos de vTEC de Swarm directamente atribuibles a este fenómeno. Además, es relevante mencionar que las horas de observación de las irregularidades de vTEC en los registros de GNSS no coinciden completamente con las horas de los pasos del satélite Alpha. Considerar también los datos del satélite Bravo y Charlie podría haber densificado los datos en la zona y haber ayudado en la comparación. Además, hay que tener en cuenta el tiempo de respuesta asociado con la altura a la que orbita el satélite Swarm, que es de aproximadamente 460 km, en comparación con los receptores GNSS que reciben señales de satélites (GPS o GLONASS) a una altura de alrededor de 20.000 km directamente a tierra. Aunque se haya realizado un calibrado en el procesamiento de datos de GNSS para evitar perturbaciones al atravesar una extensión mayor de la ionosfera, esta diferencia de altitud puede influir en la sincronización de los eventos observados en los datos de vTEC de Swarm en comparación con los datos de vTEC de GNSS.

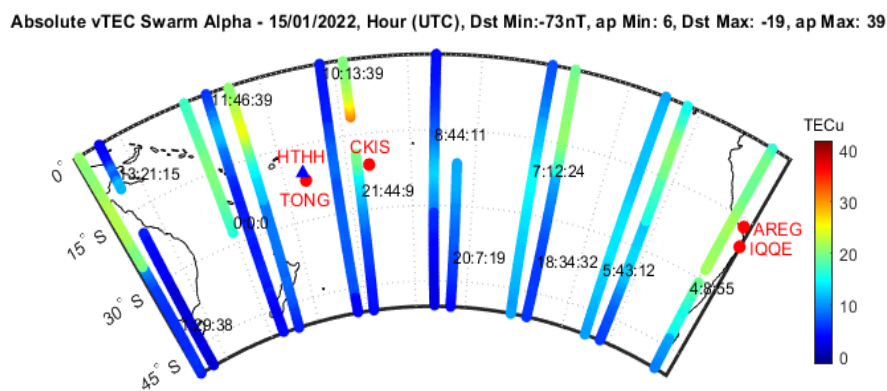


Figura 2: Variación del vTEC absoluto a partir de los datos de Swarm Alpha para el día 15 de enero de 2022.

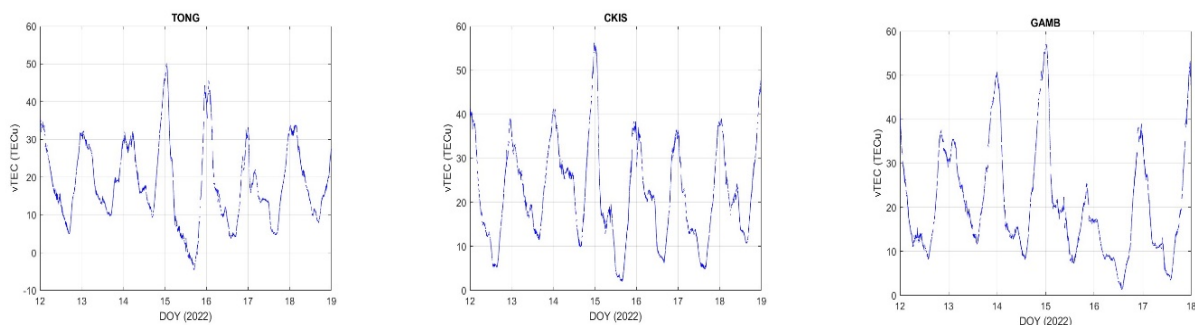


Figura 3: Variación del vTEC absoluto obtenido de las estaciones GNSS de TONG, CKIS y GAMB. Se observa una disminución notable del vTEC en los días 15 y 16

Ionogramas.

Las ionosondas que se han utilizado para el estudio, Niue y Norfolk Island, nos han proporcionado información sobre la densidad electrónica de la ionosfera para los días 14 y 15 de enero de 2022. Mediante el análisis de estos ionogramas, se han estimado las

frecuencias críticas foF2 para calcular el máximo de densidad electrónica Nm(F2) de los ionogramas. La estación Niue se sitúa a 623 kilómetros del volcán HTHH, mientras que Norfolk Island es una estación localizada a 1904 km del volcán. Es por esto por lo que los efectos más evidentes de la disminución de la densidad electrónica se ven en la primera estación, la más cercana al HTHH. La disminución más notable se produce a las 4:50 UTC. El valor de foF2 pasa de 11.5 MHz el día 14 a 4 MHz el día 15 (Figura 4 a, a'). A esta hora, por lo tanto, el máximo de densidad electrónica Nm(F2) calculado es de $1,63 \cdot 10^{12}$ electrones/m³ para el día 14 y de $1,98 \cdot 10^{11}$ electrones/m³ el día 15. Esto indica un impacto de la erupción volcánica en la densidad electrónica a unos 300 km de altura (disminución de la densidad electrónica 35 minutos después de la erupción).

Niue (Lat. Geog. -19.07; Long. Geog. -169.63) Hunga Tonga - Hunga Ha'apai (Lat. Geog. -20.56; Long. Geog. -175.38) 14/01/2022 - 15/01/2022, de 4:50h a 5:20h.

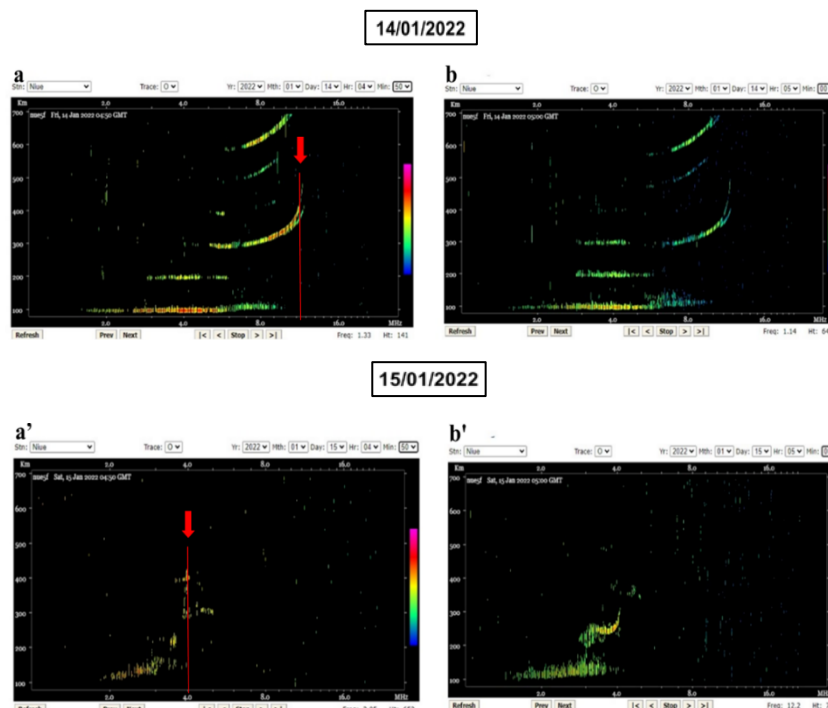


Figura 4: Ionogramas de la estación Niue del día 14/01/2022 a las **a** 4:50h **b** 5:00h y del día 15/01/2022 a las **a'** 4:50h UTC **b'** 5:00h (UTC). Los valores de foF2 están señalados con una flecha roja.

Dado que la ionosonda mide hasta la altura del pico de la región F2, que se encuentra entre 350 y 400 km, los efectos del tsunami no deberían manifestarse a esa altitud en tan poco tiempo. Las irregularidades observadas en Niue, especialmente alrededor de las 4:50, 35 minutos después de la erupción, se atribuyen a la erupción en lugar del tsunami, cuyos efectos se evidencian horas después siguiendo los tiempos de llegada de las olas. Las observaciones de Niue son cruciales para entender los efectos iniciales de la erupción volcánica en la ionosfera, sugiriendo que la explosión inicial tuvo un impacto inmediato en la densidad electrónica a gran altura.

CONCLUSIONES

Este estudio ha permitido identificar posibles variaciones ionosféricas de gran escala asociadas con el tsunami generado por la erupción del volcán HTHH el 15 de enero de 2022. Las estaciones GNSS de TONG, CKIS y GAMB, han mostrado irregularidades que podrían estar relacionadas con el paso del tsunami, y los ionogramas registrados por la ionosonda situada en Niue indican una clara disminución de densidad electrónica tras la erupción.

La comparación de los datos de vTEC de las estaciones GNSS con los datos de Swarm subraya el potencial de combinar diferentes fuentes de información para obtener una imagen más completa. Sin embargo, las horas de los pasos del satélite Alpha no coinciden con las horas en las que se observan irregularidades en las estaciones GNSS, lo que complica su comparación directa.

Por otro lado, hay que hacer hincapié en la confluencia con la tormenta geomagnética, lo que presenta un desafío adicional en la identificación clara de los efectos asociados a la erupción del volcán en contraposición a los efectos de la tormenta. Las

observaciones en los ionogramas durante el día de la tormenta muestran una disminución en el TEC, aunque esta disminución es mucho menor en comparación con la observada el día 15, cuando la tormenta ya había perdido intensidad significativa. Estos hallazgos respaldan la hipótesis de que las irregularidades observadas están más estrechamente relacionadas con la erupción volcánica que con los efectos de la tormenta geomagnética.

Los efectos observados son de gran escala, a diferencia de las variaciones típicas de TIDs, y afectan a la ionosfera en múltiples niveles. Al analizar el ROTI, se están observando escalas grandes, lo cual puede tener implicaciones significativas para los sistemas de radiocomunicación. La capacidad de detectar y monitorizar estas irregularidades puede ser crucial para mitigar el impacto de futuros eventos naturales similares.

En resumen, la combinación de datos de estaciones GNSS, satélites como los de la constelación Swarm y ionogramas ofrece una perspectiva más completa y precisa, permitiendo una mejor comprensión de los procesos ionosféricos y sus implicaciones y abriendo nuevas líneas de investigación para futuros estudios.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Servicio Internacional GNSS (IGS) por facilitar los datos GNSS, a la Agencia Espacial Europea (ESA) por proporcionar los datos de la constelación de satélites Swarm, al WDC Kyoto por los datos de índices geomagnéticos y al *Australian Space Weather Forecasting Centre* por los ionogramas. Las figuras se han generado con códigos de Matlab y el mapa de la figura 1 proviene del Servicio Geológico de los EEUU (*United States Geological Survey*).

REFERENCIAS

- [1] Bolt, B. A. (1964): "Seismic Air Waves from the Great 1964 Alaskan Earthquake". *Nature*, 202, 1095-1096. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:4272970>
- [2] Davies, K., & Baker, D. M. (1965): "Ionospheric effects observed around the time of the Alaskan earthquake of March 28, 1964". *Journal of Geophysical Research* (1896-1977), 70 (9), 2251-2253. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/JZ070i009p02251>
- [3] Calais, E., & Minster, J. B. (1995): "GPS detection of ionospheric perturbations following the January 17, 1994, Northridge Earthquake". *Geophysical Research Letters*, 22 (9), 1045-1048. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/95GL00168>
- [4] Pulinets, S. (2004): "Ionospheric Precursors of Earthquakes: Recent Advances in Theory and Practical Applications". *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 15, 413-435. [https://doi.org/10.3319/TAO.2004.15.3.413\(EP\)](https://doi.org/10.3319/TAO.2004.15.3.413(EP))
- [5] Pulinets, S., & Ouzounov, D. (2011): "Lithosphere–Atmosphere–Ionosphere Coupling (LAIC) model – An unified concept for earthquake precursors validation". *Journal of Asian Earth Sciences*, 41 (4), 371-382. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2010.03.005>
- [6] Sanchez-Dulcet, F., Rodríguez-Bouza, M., Silva, H., Herraiz, M., Bezzeghoud, M., & Biagi, P. (2015): "Analysis of observations backing up the existence of VLF and ionospheric TEC anomalies before the Mw6.1 earthquake in Greece, January 26, 2014". *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 85-86, 150-166. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pce.2015.07.002>
- [7] Perrone, L., De Santis, A., Abbattista, C., Alfonsi, L., Amoroso, L., Carbone, M., Cesaroni, C., Cianchini, G., De Franceschi, G., De Santis, A., Di Giovambattista, R., Marchetti, D., Pavón-Carrasco, F. J., Piscini, A., Spogli, L., & Santoro, F. (2018): "Ionospheric anomalies detected by ionosonde and possibly related to crustal earthquakes in Greece". *Annales Geophysicae*, 36 (2), 361-371. <https://doi.org/10.5194/angeo-36-361-2018>
- [8] Daniels, F. B. (1952): "Acoustical Energy Generated by the Ocean Waves". *The Journal of the Acoustical Society of America*, 24 (1), 83-83. <https://doi.org/10.1121/1.1906855>
- [9] Hines, C. O. (1972): "Gravity Waves in the Atmosphere". *Nature*, 239 (5367), 73-78. <https://doi.org/10.1038/239073a0>
- [10] Peltier, W. R., & Hines, C. O. (1976): "On the possible detection of tsunamis by a monitoring of the ionosphere". *Journal of Geophysical Research* (1896-1977), 81 (12), 1995-2000. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/JC081i012p01995>

- [11] Artru, J., Ducic, V., Kanamori, H., Lognonné, P., & Murakami, M. (2005): "Ionospheric detection of gravity waves induced by tsunamis". *Geophysical Journal International*, 160 (3), 840-848. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2005.02552.x>
- [12] Cahyadi, M. N., Bawasir, A., Arief, S., Widodo, A., Rusli, M., Kusumawardani, D., Rahmawati, Y., Martina, A., Maulida, P., & Lestiana, H. (2024): "Analysis of the effect of the 2021 Semeru eruption on water vapor content and atmospheric particles using GNSS and remote sensing". *Geodesy and Geodynamics*, 15 (1), 33-41.
- [13] Astafyeva, E. (2019): "Ionospheric Detection of Natural Hazards". *Reviews of Geophysics*, 57 (4), 1265-1288. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2019RG000668>
- [14] He, J., Astafyeva, E., Yue, X., Ding, F., & Maletckii, B. (2023): "The Giant Ionospheric Depletion on 15 January 2022 Around the Hunga Tonga-Hunga Ha'apai Volcanic Eruption". *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 128 (1), e2022JA030984. <https://doi.org/10.1029/2022JA030984>
- [15] Carvajal, M., Sepúlveda, I., Gubler, A., & Garreaud, R. (2022): "Worldwide Signature of the 2022 Tonga Volcanic Tsunami". *Geophysical Research Letters*, 49 (6), e2022GL098153. <https://doi.org/10.1029/2022GL098153>
- [16] Terry, J. P., Goff, J., Winspear, N., Bongolan, V. P., & Fisher, S. (2022): "Tonga volcanic eruption and tsunami, January 2022: globally the most significant opportunity to observe an explosive and tsunamigenic submarine eruption since AD 1883 Krakatau". *Geoscience Letters*, 9 (1), 24. <https://doi.org/10.1186/s40562-022-00232-z>
- [17] Fujii, Y., & Satake, K. (2024): "Modeling the 2022 Tonga Eruption Tsunami Recorded on Ocean Bottom Pressure and Tide Gauges Around the Pacific". *Pure and Applied Geophysics*. <https://doi.org/10.1007/s00024-024-03477-1>
- [18] Moges, S. T., Sherstyukov, R. O., Kozlovsky, A., Ulich, T., & Lester, M. (2024): "Statistics of Traveling Ionospheric Disturbances at High Latitudes Using a Rapid-Run Ionosonde". *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 129 (4), e2023JA031694. <https://doi.org/10.1029/2023JA031694>
- [19] Friis-Christensen, E., Lühr, H., & Hulot, G. (2006). Swarm: a constellation to study the Earth's magnetic field. *Earth Planets Space*. 58, 351–358. doi:10.1186/bf0335193

Información de la declinación geomagnética extraída de los trabajos topográficos de deslindes de municipios realizados por el IGN en el año 1871

Geomagnetic declination information extracted from the topographic field works of municipal boundaries carried out by IGN in 1871

TORDESILLAS, Jose Manuel ^(1,2); PAVÓN-CARRASCO, F. Javier ^(3,4); ANQUELA, Ana Belén ⁽⁵⁾; CAMACHO, Elena ⁽⁶⁾; LÓPEZ-MUGA, Marina ⁽⁷⁾; NÚÑEZ, Alberto ⁽⁸⁾.

⁽¹⁾ Área de Geomagnetismo, Instituto Geográfico Nacional, Observatorio Geofísico de Toledo, Toledo, España.

⁽²⁾ Departamento de Ingeniería Cartográfica Geodesia y Fotogrametría, Universitat Politècnica de València, Valencia, España

⁽³⁾ Departamento de Física de la Tierra y Astrofísica, Universidad Complutense de Madrid, Madrid, España.

⁽⁴⁾ Instituto de Geociencias (CSIC-UCM), Madrid, España.

⁽⁵⁾ Departamento de Ingeniería Cartográfica Geodesia y Fotogrametría, Universitat Politècnica de València, Valencia, España.

⁽⁶⁾ Servicio de Delimitaciones Territoriales, Instituto Geográfico Nacional, Madrid, España.

⁽⁷⁾ Centro Sismológico de Sonseca, Instituto Geográfico Nacional, Toledo, España.

⁽⁸⁾ Área de Geomagnetismo, Instituto Geográfico Nacional, Madrid, España.

Autor correspondiente: jmtordesillas@transportes.gob.es

SUMMARY

In 1871, the newly created Instituto Geográfico Nacional of Spain (IGN) began to carry out the works for the preparation of the National Topographic Map of Spain, a great project that would take almost 100 years to be completed.

These works started with the measurement of geodetic bases all over the national territory. Subsequently, the topographic surveys needed to delimit boundaries of municipalities and to represent all the planimetric elements, were performed. Part of these works were carried out with topographic compasses, which allowed to work at good speed with enough accuracy for the map requirements. The IGN preserves in its archives all the documentation generated in the works carried out to accomplish this great project. From this documentation, information of the magnetic declination measured at that time is intended to be extracted, and to be assessed as a possible source of historic geomagnetic information for its use in further works.

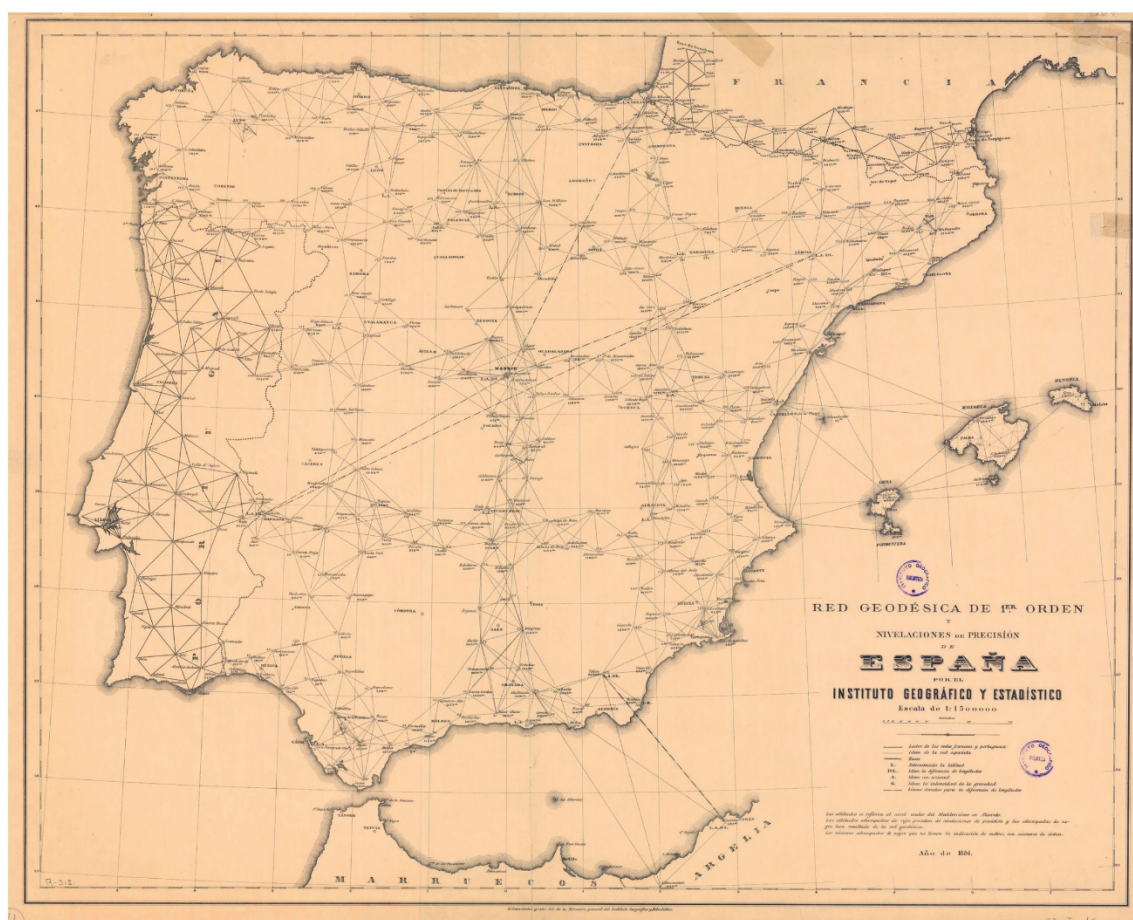
PALABRAS CLAVE

Geomagnetismo, Declinación magnética, Deslindes municipales, Brújula topográfica.

INTRODUCCIÓN

En el año 1870 se creó el Instituto Geográfico (Real Decreto de 12 de septiembre de 1870), heredero de la Junta General de Estadística y germen del actual Instituto Geográfico Nacional (IGN). Entre sus principales cometidos se estableció la creación de una red geodésica que cubriese todo el territorio español, la realización de nivelaciones de precisión, así como los trabajos topográficos encaminados a la creación del Mapa Topográfico Nacional.

Los trabajos geodésicos ya habían sido proyectados en el año 1853 definiéndose una red formada por cadenas de triangulación con la siguiente distribución: tres cadenas de paralelos, cuatro cadenas de meridianos y tres cadenas de costa como se muestra en la figura 1 (<http://atlasnacional.ign.es/index.php?curid=1499>). Su observación comenzó en 1854 y en 1858 se midió la base central de Madrideojos (Toledo) usando una regla bimetálica de platino y latón diseñada y construida para tal efecto. El Instituto Geográfico publicó un manual con las instrucciones que debían de seguirse para llevar a cabo estos trabajos geodésicos (Instituto Geográfico y Estadístico, 1878a). Dicho manual define las instrucciones para el establecimiento y observación de una red geodésica de primer orden que incluye la definición de bases geodésicas, elección y preparación de los vértices geodésicos y la observación acimutal y cenital de la red. Igualmente se definen las instrucciones para la realización de nivelaciones de precisión que incluyen la determinación del nivel medio del mar mediante mareógrafos. Por último, se definieron las instrucciones para la densificación con unas redes geodésicas de 2º y 3er orden.



Instituto Geográfico y Estadístico. Red Geodésica de 1ª. Orden y Nivelaciones de Precisión de España. Escala 1:1.500.000. 1886, Instituto Geográfico Nacional, 33-I-10

Figura 1: Diseño de la red geodésica de primer orden observada por el Instituto Geográfico (<http://atlasnacional.ign.es/index.php?curid=1499>).

Estos trabajos geodésicos sirvieron de base para la realización en paralelo de los trabajos topográficos en cada municipio de España, que comenzaron en el año 1871 y cuyas instrucciones fueron redactadas conforme al Plan de operaciones del Instituto Geográfico aprobado el 30 de septiembre de 1870 y firmadas por su director el General Ibáñez Ibero (IGN, 2024). Posteriormente se publicaría un manual (Instituto Geográfico y Estadístico, 1878b) que recogía estas instrucciones para realizar los trabajos de triangulación topográfica, el señalamiento de los mojones y líneas de término, la representación planimétrica de los accidentes topográficos, edificios aislados, elementos singulares y polígonos de producciones agrícolas, los planos de poblaciones de más de diez edificios y la representación del relieve del terreno.

De todos estos trabajos topográficos que se llevaron a cabo, resultan de especial interés para nosotros los trabajos de determinación de las líneas límite entre cada dos términos municipales. Dichos trabajos comenzaban con el señalamiento de los mojones que definían las líneas límite, con la asistencia de los Ayuntamientos, y la elaboración de las correspondientes actas tal como se define en las correspondientes instrucciones y teniendo en cuenta cómo actuar en función de las posibles faltas de acuerdo y disputas. Una vez terminado el señalamiento de mojones se procedía al levantamiento del plano de dichas líneas límite mediante itinerarios ejecutados con **brújula topográfica** (figura 2) y midiendo las distancias con cinta métrica o mira estadimétrica. Las observaciones se consignaban mediante un formulario definido para tal efecto (figura 3).



Figura 2: Brújula topográfica utilizada en los levantamientos de las líneas límites municipales.

Formulario núm. 13.

INSTITUTO GEOGRÁFICO Y ESTADÍSTICO.

TRABAJOS TOPOGRÁFICOS.

PROVINCIA _____ REGION _____

_____ BRIGADA.

TÉRMINO MUNICIPAL _____

ITINERARIOS CON BRÚJULA.

CUADERNO NÚM. _____

Brújula de _____, núm. _____, cuya
declinación es de _____

Observador: D. _____

Estaciones.	PUNTOS OBSERVADOS.	RUMBOS.		Distancias. — Metros.	NOTAS.
		N.	S.		
Itinerario n.º 27. Empieza en el punto 27 del Itinerario n.º 5 (camino de la Hoya), y termina en el punto 32 del Itinerario n.º 4 (arroyo de la Gálja). Determina el Camino del Valle.					
1	27 del Itinerario núm. 5.	272 15	92 30	136,40	
2	1.	254 15	111 30	205,03	
3	2.	297 15	117 30	324,17	
3	Vértice Morron.	280 30	100 00	31,25	
4	3.	300 00	119 15	151,20	
5	Morron. 4.	191 00	11 30	68,25	
5	5.	302 15	122 30	214,55	
6	5. Hita de Piedra.	285 15	105 30	322,93	El punto 7 está en el punto de maduración del arroyo de Pastores.
7	6.	264 30	84 15	281,52	
8	7. Punto 14 del Itin.º 8.	269 00	89 00	203,65	
9	8.	272 15	92 00	232,20	
10	9.	301 30	121 15	301,15	
11	10.	323 00	143 30	214,40	
12	11. Punto 32 del Itin.º 4.	312 15	132 30	126,42	
Itinerario n.º 28. Empieza en el punto 7 del Itinerario n.º 24 (Hita de piedra), y termina en el punto 54 del Itinerario n.º 48 (Arroyo de la Gálja). Determina el Camino de la Calera.					
1	7 del Itinerario 24.	63 15	213 00	172,28	
2	1.	71 30	254 15	192,35	
3	2. Casa del pozo de la nieve	68 00	218 15	73,20	

(Media firma del Observador).

Figura 3: Formulario 13 del libro de instrucciones topográficas.

En este manual también se establecen una serie de precauciones que deben tenerse a la hora de realizar los trabajos con brújula: la obligación de declinar la brújula de cada observador antes de comenzar las operaciones, comprobar una vez por semana dicha declinación y anotar en los cuadernos de campo la declinación obtenida. Además, se prohibía a los operadores conservar durante las observaciones, a menos de veinte metros de distancia de la brújula, cualquier objeto de hierro que por su magnitud pudiera influir a la aguja imantada.

Dado que los valores obtenidos al declinar las brújulas eran anotados al comienzo de cada cuaderno de campo, se pretende con este estudio el determinar si dichos valores pueden utilizarse como una fuente de datos útil de los valores de declinación existentes en la época en que se realizaron las observaciones. Estos datos vendrían a completar a las primeras observaciones geomagnéticas que realizó el IGN en el siglo XIX en el Real Observatorio de Madrid (ROM), que recientemente han sido utilizadas para analizar la evolución de la declinación en el ROM entre los dos últimos pasos de la línea ágena (Tordesillas et al., 2024).

EL ARCHIVO TOPOGRÁFICO DEL IGN

En la actualidad, el IGN cuenta con un importante archivo topográfico, donde se conserva toda la documentación generada en estos trabajos de campo por cada uno de los municipios de España.

La colección de cuadernos de campo es muy amplia, e incluye entre otros a los cuadernos de triangulaciones, mediciones de bases, nivelaciones, planimetrías de municipios, actas de deslindes de líneas límite, itinerarios de brújula, entre ellos los de líneas límite y cálculos de la declinación de la brújula. Estos últimos (figura 4) podrían considerarse como una fuente muy valiosa para obtener los datos de declinación. Sin embargo, esta documentación no está digitalizada y su localización en el archivo no es sencilla (con carácter general está incluida dentro de los cuadernos de itinerarios de brújula guardados en los legajos de cada uno de los términos municipales), por lo que la obtención de esta información es complicada.

En los cuadernos de campo de itinerarios de brújula se anotaba en su portada, entre otros datos, la información sobre la brújula utilizada, la declinación de dicha brújula, el observador y una fecha -la de incorporación del documento al archivo topográfico, la del levantamiento o ambas-, así como los términos municipales de los términos municipales deslindados en el caso de que el cuaderno fuera además de línea límite. Esta información está disponible para cada municipio y es fácil de localizar dentro del Archivo Topográfico del IGN.

*Cálculo para la declinación de la brújula. Cuaderno Leguas n.º 664
cuya graduación es anormal... por medio de la estrella Polar.
La observación se verificó el día 2 de Diciembre de 1917.
Posición geográfica del lugar de observación... { Latitud 42° 17'
Longitud 0° 27' W*

	D	m	I	D	m	I
Tiempos del reloj corregidos de estado.....	2	05	2	15	2	38
Paso superior de la Polar por el meridiano local el día.....	21	04	21	04	21	04
Horario..... de la Polar.....	5	01	5	11	5	34
Azmut de la Polar.....	1	30	1	31	1	32
Rumbos leídos.....	13	45	13	30	13	30
Rumbos corregidos.....	15	15	15	01	15	02
Declinación de la brújula.....	15	15	15	01	15	02

Declinación.....	15	15
Declinación.....	15	01
Declinación.....	15	02
Declinación.....	15	02
Suma.....	60	20
Promedio.....	15	05

*Cartagena 3 de Diciembre de 1917.
El Topógrafo Quintero 1.º de Geografía
J. Quintero*

*Confirma
El Jefe de la Brigada
Rafael Romero*

*Burgos 10 de Junio de 1918.
Revisado:
El Jefe del Centro.
J. Quintero*

Figura 4: Ejemplar del cálculo de la declinación de la brújula conservado en el Archivo Topográfico del IGN.

Además, desde el Servicio de Documentación Geográfica y Biblioteca del IGN se ha hecho una importante labor de digitalización de los fondos del Archivo Topográfico, habiéndose escaneado la documentación relativa a los trabajos de deslindes municipales, que incluye a las actas de deslinde y a los cuadernos de campo levantados desde el inicio de los trabajos de campo en 1871. Dicha documentación está puesta a disposición de los usuarios a través del Centro de Descargas del Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG), <https://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/actas-cuadernos-resenas-graficos-lineas-limite>.

EVALUACIÓN DE LOS DATOS ANOTADOS EN LOS CUADERNOS DE CAMPO

A partir de los cuadernos de campo de los itinerarios de las líneas límite que están disponibles en el Centro de Descargas del CNIG, hemos realizado una selección de todos los cuadernos correspondientes al año 1871, año en que comenzaron los trabajos de campo. Los datos de declinación obtenidos en estos cuadernos nos servirán para hacer un estudio de la su calidad y determinar su bondad como fuente de datos para futuros trabajos.

Como resultado de nuestra consulta, hemos comprobado la existencia de 166 cuadernos, los cuales corresponden principalmente

a deslindes realizados en las provincias de Sevilla y Córdoba. Al revisar estos cuadernos, anteriores a la publicación de los modelos mostrados en la figura 3, vemos que en sus portadas se incluía la información de los ayuntamientos entre los que se realizaba el deslinde, pero en pocos de los cuadernos se anotaba el modelo de brújula que se utilizaba y el número de serie. Sí que se pueden encontrar, bien en la portada (figura 5) o bien en el interior del cuaderno, los datos correspondientes a la declinación de la brújula utilizada, pero el dato de la fecha del levantamiento se anotaba de forma irregular, encontrándonos casos en los que disponemos del día exacto al que se realizó el levantamiento, casos en los que sólo disponemos del mes, y casos en los que no conocemos más que el año. Igualmente, se ha comprobado que en algunos de los ficheros consultados aparecen los datos de varios cuadernos, por lo que hemos obtenido los datos de declinación correspondientes a 186 deslindes entre términos municipales.

Para poder procesar estos datos, hemos adjudicado el valor de declinación extraído de cada cuaderno de campo al término municipal que aparece en primer lugar, como principal. A cada uno de estos términos municipales, le hemos asignado unas coordenadas latitud y longitud, las cuáles hemos extraído del Nomenclátor Geográfico de Municipios y Entidades de Población también disponible en la web del Centro de Descargas del IGN-CNIG.

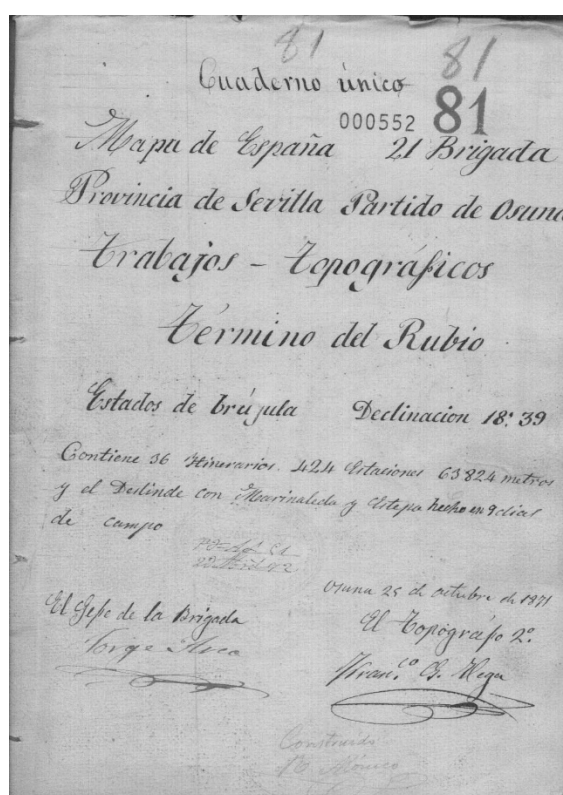


Figura 5: Portada de un cuaderno de campo de un itinerario de deslinde realizado en 1871.

Para poder comparar los valores de declinación asignados a cada uno de estos municipios en la fecha del correspondiente levantamiento, hemos calculado el valor de declinación que prevé el modelo geomagnético *gumf1* (Jackson, 2000) a partir de las coordenadas y fechas que tenemos para los levantamientos. La diferencia entre los valores obtenidos por el modelo *gumf1* y los obtenidos desde los cuadernos de campo nos da un residuo cuya distribución se muestra en la figura 6. Como se puede observar, los residuos siguen una distribución con la mayoría de los valores situados en el rango entre -1° y 1° , observándose algunos valores que se salen de este rango. Estos residuos no solo tienen en cuenta la diferencia de declinaciones entre el dato obtenido de los cuadernos de campo y el dato obtenido del modelo *gumf1* debido al campo geomagnético principal, sino que también incluyen la contribución del campo cortical dada en los datos de los cuadernos de campo. Sin embargo, esta última contribución es muy pequeña en relación con el residuo obtenido.

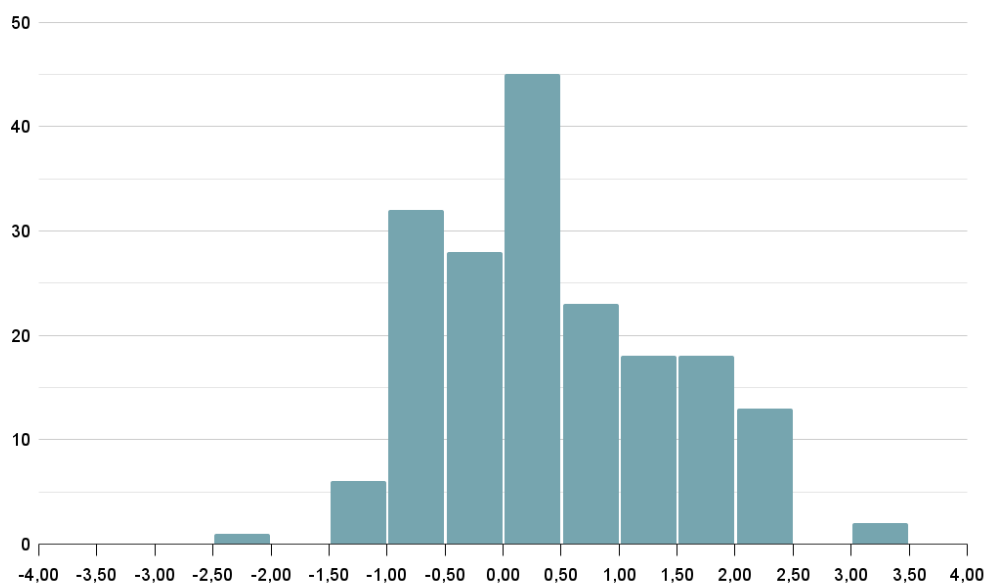


Figura 6: Histograma de los residuos resultantes al evaluar todos los cuadernos de campo seleccionados.

No obstante, tenemos algunos casos en los que existen diferentes valores para un mismo término municipal, ya que en distintas fechas se llevaron a cabo los distintos itinerarios de deslinde con cada uno de los términos colindantes. En estos casos, hemos procedido a promediar los valores de declinación sacados de los cuadernos de campo, así como los valores calculados con el modelo *gufm1*, obteniendo un único valor por municipio. Calculado de nuevo el valor de los residuos (tabla 1), se obtiene un nuevo histograma de su distribución que se muestra en la figura 7. Como se puede observar, en este caso la distribución es normal, con un rango de valores entre $-1,5^\circ$ y $2,5^\circ$. Esto es consecuencia de que, al realizar los promedios de los valores de declinación, la contribución del campo cortical a los residuos, relativa a los datos de los cuadernos de campo, se ha reducido.

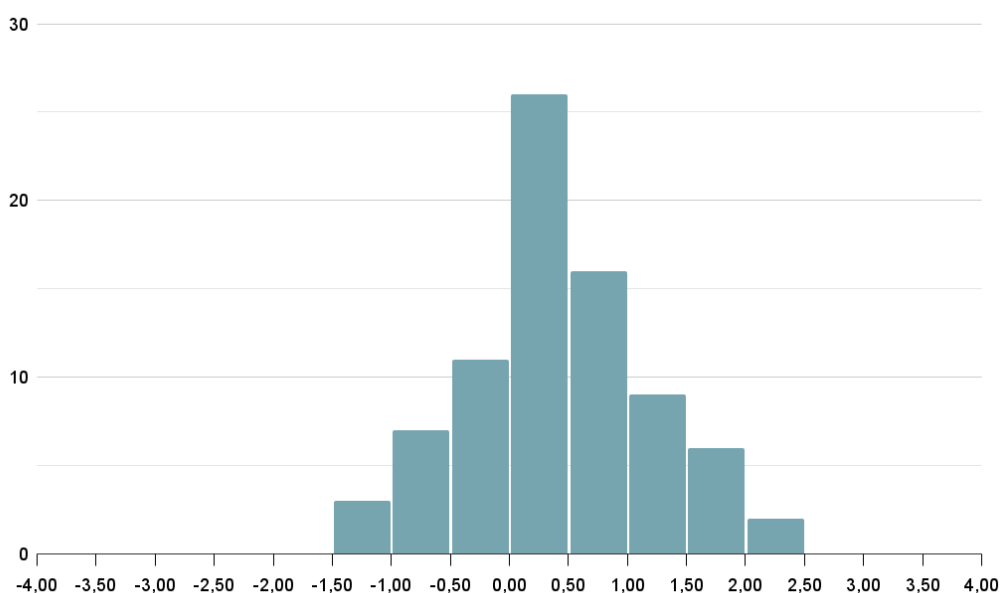


Figura 7: Histograma de los residuos resultantes al promediar valores de un mismo término municipal.

Tabla 1: Relación de los valores de declinación obtenidos a partir de los cuadernos de campo, valores obtenidos a partir del

modelo geomagnético *gufm1*, y residuos al calcular su diferencia.

Provincia	Ayuntamiento	Coordenadas nomenclátor		Declinación brújula	Declinación gufm1	RESIDUO
		Latitud	Longitud			
Sevilla	Alcalá de Guadaíra	37.3347	-5.8507	-19.425	-19.000	-0.425
Sevilla	Alcolea del Río	37.6147	-5.6717	-18.000	-18.976	0.976
Sevilla	La Algaba	37.4611	-6.0132	-18.050	-19.096	1.046
Sevilla	Almadén de la Plata	37.8735	-6.0796	-18.783	-19.203	0.420
Sevilla	Almensilla	37.3089	-6.1133	-19.050	-19.108	0.058
Sevilla	Paradas	37.2899	-5.4962	-19.900	-18.859	-1.041
Sevilla	Carmona	37.4727	-5.6332	-18.560	-18.965	0.405
Sevilla	Casarriche	37.2954	-4.7592	-19.128	-18.641	-0.487
Sevilla	Cazalla de la Sierra	37.9293	-5.7587	-18.783	-19.106	0.322
Sevilla	Dos Hermanas	37.2889	-5.9133	-18.433	-18.998	0.565
Sevilla	Écija	37.5408	-5.0754	-18.664	-18.783	0.119
Sevilla	Lora del Río	37.6533	-5.5304	-17.150	-18.973	1.823
Sevilla	Osuna	37.2376	-5.1012	-18.383	-18.716	0.332
Sevilla	El Rubio	37.3556	-4.9902	-18.650	-18.699	0.049
Sevilla	Santiponce	37.4330	-6.0363	-18.683	-19.111	0.427
Sevilla	Utrera	37.1794	-5.7809	-19.967	-18.949	-1.018
Sevilla	Villanueva del Río y Minas	37.6572	-5.7117	-19.000	-19.037	0.037
Sevilla	Villanueva de San Juan	37.0504	-5.1757	-18.317	-18.741	0.424
Córdoba	Luque	37.5596	-4.2777	-18.033	-18.520	0.487
Córdoba	Montemayor	37.6475	-4.6990	-18.117	-18.731	0.614
Córdoba	Cardeña	38.2704	-4.3243	-17.833	-18.667	0.834
Córdoba	Monturque	37.4736	-4.5809	-17.550	-18.654	1.104
Córdoba	Palma del Río	37.7011	-5.2852	-18.500	-18.898	0.398
Córdoba	Priego de Córdoba	37.4398	-4.1918	-19.379	-18.469	-0.910
Córdoba	Puente Genil	37.3883	-4.7723	-18.433	-18.684	0.250
Córdoba	La Rambla	37.6086	-4.7408	-18.236	-18.697	0.461
Córdoba	Rute	37.3253	-4.3702	-18.000	-18.511	0.511
Córdoba	Santaella	37.5675	-4.8466	-18.008	-18.720	0.712
Córdoba	Santa Eufemia	38.5961	-4.9050	-18.475	-18.914	0.439
Córdoba	Valenzuela	37.7750	-4.2194	-17.250	-18.539	1.289
Córdoba	Valsequillo	38.4051	-5.3517	-19.733	-19.057	-0.676
Córdoba	La Victoria	37.6808	-4.8526	-18.367	-18.743	0.377
Córdoba	Villa del Río	37.9823	-4.2909	-17.550	-18.602	1.052
Córdoba	Villaharta	38.1397	-4.9031	-18.317	-18.847	0.531
Córdoba	Villanueva del Duque	38.3927	-4.9995	-19.533	-18.903	-0.631
Córdoba	Villaviciosa de Córdoba	38.0764	-5.0147	-18.994	-18.875	-0.120
Córdoba	El Viso	38.4838	-4.9555	-18.900	-18.927	0.027
Córdoba	Zuheros	37.5438	-4.3165	-18.033	-18.531	0.498
Sevilla	Lantejuela	37.3535	-5.2236	-19.300	-18.779	-0.521
Sevilla	Pedraza	37.2234	-4.8955	-18.958	-18.644	-0.314
Córdoba	Hornachuelos	37.8312	-5.2423	-19.617	-18.922	-0.695
Córdoba	Aguilar de la Frontera	37.5200	-4.6606	-18.025	-18.676	0.651
Córdoba	Torrecaño	38.4745	-4.6803	-16.742	-18.783	2.042
Córdoba	Dos Torres	38.4455	-4.8950	-17.417	-18.872	1.455
Córdoba	Alcaracejos	38.3866	-4.9671	-19.400	-18.941	-0.459

Córdoba	Añora	38.4126	-4.8975	-19.250	-18.942	-0.308
Córdoba	Pozoblanco	38.3789	-4.8496	-17.789	-18.834	1.045
Córdoba	Villafranca de Córdoba	37.9623	-4.5455	-18.128	-18.673	0.545
Córdoba	Almedinilla	37.4395	-4.0900	-18.367	-18.434	0.067
Córdoba	Baena	37.6132	-4.3290	-18.033	-18.548	0.515
Córdoba	Belalcázar	38.5784	-5.1664	-19.500	-19.070	-0.430
Córdoba	Los Blázquez	38.4068	-5.4381	-18.867	-19.088	0.221
Córdoba	Bujalance	37.8965	-4.3834	-17.675	-18.619	0.944
Córdoba	Cabra	37.4710	-4.4466	-18.033	-18.564	0.530
Córdoba	Cañete de las Torres	37.8673	-4.3177	-16.717	-18.590	1.873
Córdoba	Carcabuey	37.4445	-4.2731	-18.725	-18.498	-0.227
Córdoba	La Carlota	37.6752	-4.9323	-17.050	-18.770	1.720
Córdoba	El Carpio	37.9405	-4.4995	-16.925	-18.668	1.743
Córdoba	Castro del Río	37.6904	-4.4817	-17.425	-18.615	1.190
Córdoba	Conquista	38.4096	-4.5006	-17.525	-18.742	1.217
Córdoba	Córdoba	37.8795	-4.7803	-17.100	-18.768	1.668
Córdoba	Doña Mencía	37.5554	-4.3594	-18.033	-18.548	0.515
Córdoba	Encinas Reales	37.2733	-4.4872	-18.750	-18.543	-0.207
Córdoba	Espejo	37.6808	-4.5538	-17.133	-18.639	1.506
Córdoba	Adamuz	38.0251	-4.5262	-17.783	-18.693	0.909
Córdoba	Espiel	38.1891	-5.0173	-18.000	-18.848	0.848
Córdoba	Villanueva del Rey	38.2005	-5.1508	-18.750	-18.946	0.196
Córdoba	Fernán-Núñez	37.6683	-4.7193	-18.533	-18.716	0.183
Córdoba	Fuente la Lancha	38.4221	-5.0489	-19.800	-19.001	-0.799
Córdoba	Fuente Obejuna	38.2670	-5.4192	-18.929	-19.054	0.125
Córdoba	Fuente Palmera	37.7032	-5.1041	-19.767	-18.820	-0.947
Córdoba	Fuente-Tójar	37.5094	-4.1452	-18.867	-18.465	-0.401
Córdoba	La Granjuela	38.3699	-5.3517	-18.750	-19.050	0.300
Córdoba	Guadalcázar	37.7585	-4.9454	-17.294	-18.782	1.488
Córdoba	El Guijo	38.4962	-4.7834	-16.433	-18.850	2.416
Córdoba	Hinojosa del Duque	38.5006	-5.1485	-18.750	-19.004	0.254
Córdoba	Hornachuelos	37.8312	-5.2423	-19.308	-18.925	-0.384
Córdoba	Iznájar	37.2573	-4.3082	-18.375	-18.478	0.103
Córdoba	Lucena	37.4090	-4.4845	-18.000	-18.566	0.566
Córdoba	Almodóvar del Río	37.8094	-5.0208	-20.000	-18.818	-1.182
Madrid	Santorcaz	40.4723	-3.2350	-19.200	-18.706	-0.494
Madrid	Valverde de Alcalá	40.4189	-3.2985	-17.300	-18.695	1.395
Sevilla	El Saucejo	37.0711	-5.0974	-19.583	-18.717	-0.866
Sevilla	Pedreira	37.2234	-4.8955	-19.383	-18.675	-0.708
Sevilla	La Roda de Andalucía	37.1994	-4.7797	-19.083	-18.631	-0.452
Córdoba	Montoro	38.0264	-4.3813	-17.200	-18.642	1.442

CONCLUSIONES

A la vista de los resultados obtenidos, podemos concluir que los levantamientos de las líneas límite realizados a finales del siglo XIX pueden ser considerados como una fuente válida de datos de declinación.

Hay que tener en cuenta que la precisión de estos valores está limitada por la propia precisión de los instrumentos que se utilizaban para realizar estos levantamientos, pensados para realizar levantamientos topográficos y no para trabajos geomagnéticos.

Como se ha podido ver, los residuos que se han obtenido son pequeños y siguen una distribución normal, por lo que se pueden utilizar en futuros estudios más amplios, siempre teniendo en cuenta sus limitaciones.

REFERENCIAS

- [1] Instituto Geográfico y Estadístico (1878a): "Instrucciones para los trabajos geodésicos". Instituto Geográfico y Estadístico. Madrid.
- [2] Instituto Geográfico y Estadístico (1878b): "Instrucciones para los trabajos topográficos". Instituto Geográfico y Estadístico. Madrid.
- [3] Instituto Geográfico Nacional (2024): http://www.ign.es/web/biblioteca_cartoteca/abnetcl.cgi?TITN=10501
- [4] Jackson, A., A. Jonkers and M. Walker (2000): "Four centuries of geomagnetic secular variation from historical records". Philos. Trans. Royal Soc. A., 358, 957-990.
- [5] Tordesillas, J. M., Pavón-Carrasco, F. J., Nuñez, A., and Anquela, A. B. (2024): "Historical evolution of the geomagnetic declination at the Royal Observatory of Madrid". Hist. Geo Space. Sci., 15, 81–94, <https://doi.org/10.5194/hgss-15-81-2024>

S.04

Vulcanologia

Vulcanología

Gestión de datos y servicios de la comunidad vulcanológica europea por el Servicio Central Temático de Observaciones de Volcanes (EPOS-ERIC)

Data and service management of the European volcanological community by the Volcano Observations Thematic Core Service (EPOS-ERIC)

SPAMPINATO, Letizia ⁽¹⁾; DOMÍNGUEZ-CERDEÑA, Itahiza ⁽²⁾; INDOVINA, Enrico ⁽¹⁾; GEYER, Adelina ⁽³⁾; JÚLÍUSDÓTTIR, Ríkey ⁽⁴⁾; REITANO, Danilo ⁽¹⁾; PUGLISI, Giuseppe ⁽¹⁾; NAVE, Rosella ⁽¹⁾; SANTANGELO, Ileana ⁽¹⁾; VOGFJÖRD, Kristín ⁽⁴⁾; LABAZUY, Philippe ⁽⁵⁾; CACCIOLA, Lucia ⁽¹⁾; GUEHENNEUX, Yannick ⁽⁴⁾; KOMOROWSKI, Jean-Christophe ⁽⁶⁾; SAUREL, Jean-Marie ⁽⁶⁾

⁽¹⁾ Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Italy.

⁽²⁾ Instituto Geográfico Nacional, Santa Cruz de Tenerife, Spain.

⁽³⁾ Geosciences Barcelona, CSIC, Barcelona, Spain.

⁽⁴⁾ Icelandic Meteorological Office, Iceland.

⁽⁵⁾ Université Clermont Auvergne, CNRS, OPGC, Clermont-Ferrand, France.

⁽⁶⁾ Université Paris Cité, Institut the Physique du Globe, CNRS, Paris, France.

Autor correspondiente: ifdominguez@transportes.gob.es

SUMMARY

The Volcano Observations Thematic Core Service (VOLC-TCS) is one of 10 core services forming the European Plate Observing System European Research Infrastructure Consortium (EPOS-ERIC). The main objective of the VOLC-TCS is the implementation of a technical, financial and legal framework compliant with EPOS-ERIC for (i) strengthening the European volcanology community made by Volcano Observatories (VOs) and Volcanological Research Institutions (VRIs), and (ii) providing virtual access to their data, data products and services of the EU and pan-EU volcanoes. One of the main challenges in the management of volcanological data has consisted in their great heterogeneity, regarding technical characteristics, and also legal aspects (e.g., different data policies among the data providers, different purposes for the use of data from science to monitoring, early-warning, information, etc.). Another challenge has derived from the consistency of the VOLC-TCS with the service provision of EPOS, whose characteristic is to merge different Earth Science communities (seismology, GNSS, geomagnetic, geochemistry, geology, etc.). Some of the services used in volcanology are in common with other communities, thus the implementation work was also devoted to harmonising the provision of data and products standardised by other TCSs with the provision of volcanological services. Another important task has been the implementation of the community Gateway for accessing services not fully compliant with EPOS to be visible in EPOS and creating the conditions to likely interface the VOLC-TCS with data infrastructures operating at global level (e.g., WOVodat). Based on the experience gained and on the results achieved, here we report the state of the art of the VOLC-TCS implementation from 2018 and propose future actions addressing some of the main technical challenges as well as ensuring the mid-long term sustainability of the services. These activities are part of the EPOS-ES node and of the EPOS-SpN RED2022-134516-E project is funded by MCIN/AEI/10.13039/501100011033

PALABRAS CLAVE

Volcanología, EPOS.

INTRODUCCIÓN

El Sistema de Observación de la Placa Europeo (EPOS European Plate Observing System; epos-eu.org) es una plataforma cuyo objetivo es proporcionar acceso a datos, productos de datos, servicios y software (DDSSs, o Data Services), lo que implica la creación de nuevas herramientas de informáticas para desentrañar la dinámica y complejidad de la Tierra. Dentro de EPOS se encuentra el VOLC-TCS (Tematic Core Service), uno de los diez servicios centrales temáticos de la infraestructura de investigación distribuida EPOS. El alcance científico de EPOS es hacer avanzar a la comunidad de las Ciencias de la Tierra hacia una investigación más multidisciplinar en las fronteras y el desarrollo de nuevos modelos que son cruciales para responder a cuestiones científicas

y socioeconómicas relativas a los riesgos geológicos y los georrecursos aplicando el paradigma de la Ciencia Abierta. La Figura 1 muestra la arquitectura de EPOS en la que se pueden identificar los principales elementos técnicos y estructurales conectados, es decir, las Infraestructuras Nacionales de Investigación (NRI), los Servicios Centrales Temáticos (TCS) y los Servicios Centrales Integrados (ICS) (más detalles en Puglisi et al. 2022 y epos-eu.org). EPOS se convirtió en un ERIC (Consortio Europeo de Infraestructuras de Investigación) a finales de 2018; sin embargo, la comunidad ha estado trabajando en este proyecto a largo plazo desde 2002 dentro de cuatro fases principales: la Fase de Concepción de EPOS (2002-2008), la Fase Preparatoria de EPOS (2010-2014), la Fase de Implementación de EPOS (2015-2019) y la Fase de Sostenibilidad de EPOS (2019-2022). Cada una de estas fases fue financiada por un proyecto del Foro Estratégico Europeo de Infraestructuras de Investigación (ESFRI) (Puglisi et al. 2022). El VOLC-TCS tiene como objetivo promover la investigación en vulcanología en Europa mediante el fomento del intercambio de conocimientos y la colaboración científica a través de la provisión de acceso sostenible a largo plazo a las DDSS de los Observatorios Volcánicos Europeos (VOs) y las Instituciones de Investigación Volcanológica (VRIs). Así, VOLC-TCS está trabajando para apoyar a la comunidad europea de VOs y VRIs; implementar servicios interoperables para asegurar el acceso sostenible y a largo plazo a sus DDSSs; y promover buenas prácticas dentro de la comunidad vulcanológica a través de EPOS (Puglisi et al. 2022; Wessels et al. 2022).

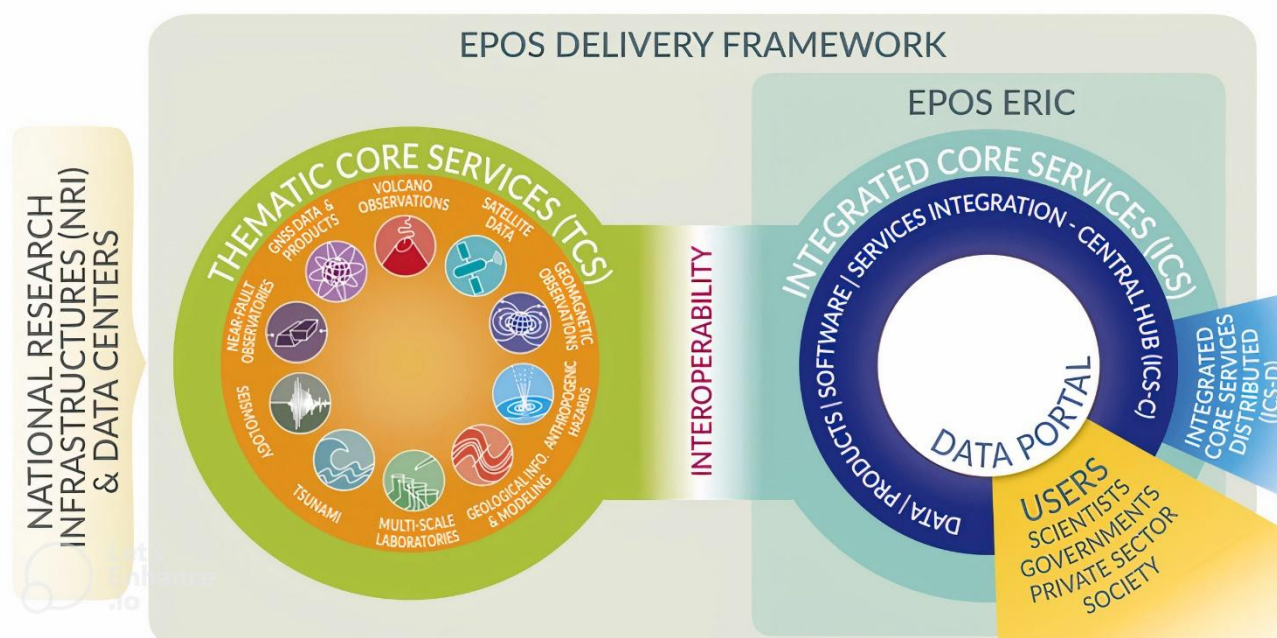


Figure 1: Elementos clave de la arquitectura funcional de EPOS. De izquierda a derecha: Las Infraestructuras Nacionales de Investigación (NRI) proporcionan datos y servicios a los Servicios Centrales Temáticos (TCS) que, a su vez, dan acceso a los usuarios a través del Centro de Servicios Centrales Integrados (ICS-C). El Servicio Central Integrado - Distribuido - (ICS-dD) toma datos de ICS-C para producir datos de nivel superior (tomados de <https://www.epos-eu.org/>).

EL TCS DE VOLCANOLOGÍA

El VOLC-TCS se organiza en una estructura de capas y está conectada a la infraestructura EPOS, como se muestra en la Figura 2. El papel principal en el VOLC-TCS lo desempeñan los VO y los VRI, que son los Proveedores de Servicios (SP) para el TCS. La capa inferior de la estructura incluye a los Proveedores de Datos (DP) que dan acceso a sus DDSS a través de los SP del VOLC-TCS, mientras que la capa superior está formada por los órganos de Gobierno y Coordinación del TCS (Puglisi et al. 2022). A principios de 2024, los SP del VOLC-TCS son el Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV, Italia), que es también el coordinador del VOLC-TCS, la Oficina Meteorológica Islandesa (IMO, Islandia), la Agencia Estatal Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) que junto al Instituto Geográfico Nacional (IGN) representan a España, y el Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS, Francia). Los SP están comprometidos con el VOLC-TCS a través de un Acuerdo de Consorcio en el que se identifican diferentes órganos de gobierno con diversas funciones (Puglisi et al. 2022). Los DDSS de VOLC-TCS son intrínsecamente heterogéneos por naturaleza, y sus características han tenido un impacto significativo en la implementación y provisión del servicio. Son heterogéneos ya que los datos que se manejan en Volcanología incluyen muchas técnicas distintas, desde Sismología, Geodesia (desde tierra y satélite) Geología, Geoquímica, etc... De hecho, la gestión de tal heterogeneidad ha

representado uno de los principales retos para el VOLC-TCS, aunque incuestionablemente tal peculiaridad representa un gran recurso para los usuarios en términos de variedad de información disponible. Las DDSS actualmente disponibles son de tipo geofísico, geoquímico, geológico y vulcanológico e incluyen datos recogidos tanto por instrumentos in situ como remotos (terrestres y por satélite) (Tabla 1). Además, los DDSS presentan diversos niveles de procesamiento, desde datos adquiridos automáticamente (nivel 0; por ejemplo, formas de onda sísmica) hasta productos de datos más elaborados/integrados (nivel 3; por ejemplo, mapas de peligrosidad). De hecho, dada la ubicación de los VOs y los VRIs, los DDSSs también difieren geográficamente, incluyendo volcanes europeos y volcanes en territorios europeos de ultramar (Tabla 1).

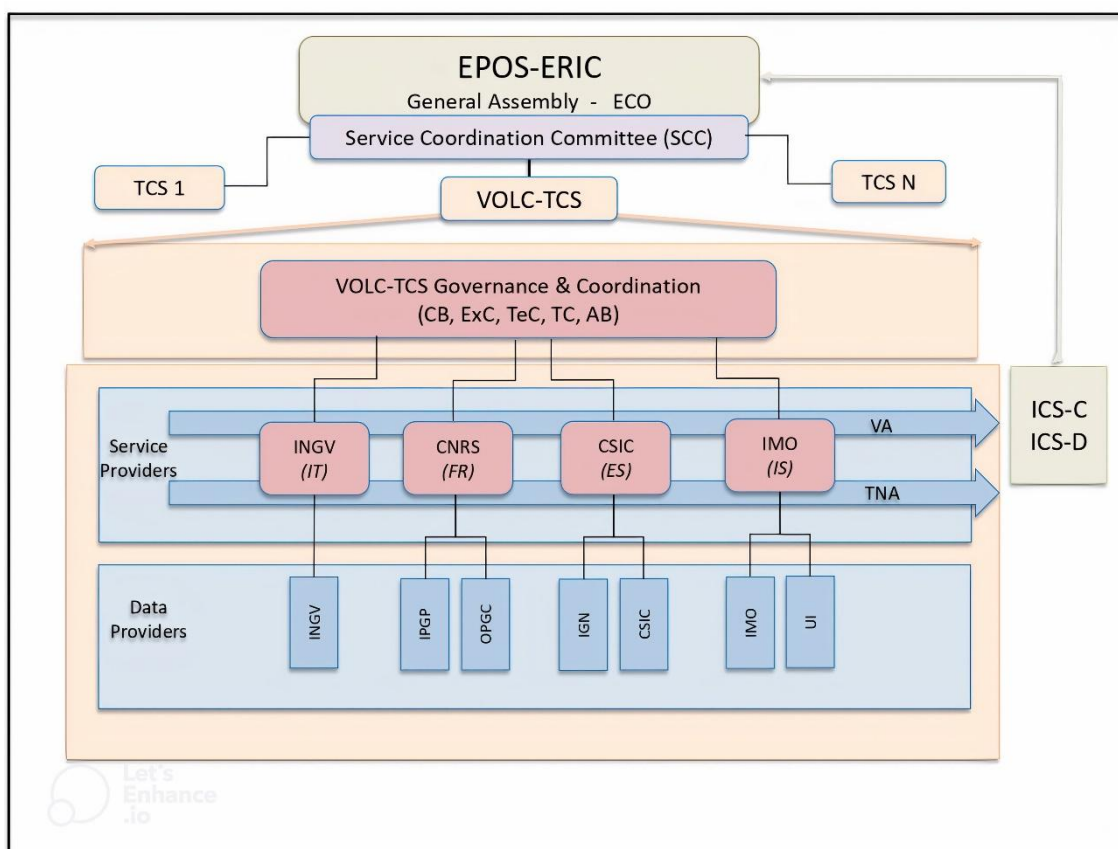


Figura 2: Arquitectura general del VOLC-TCS. El nivel inferior se refiere a la fuente de los VOLC-DDSS disponibles a través de los Proveedores de Datos (DP) y los Proveedores de Servicios (PS) y coordinados por los Consorcios Nacionales (si existen). El nivel medio se refiere a la gestión técnica de los servicios (servicios de Acceso Virtual y Transnacional; VA y TNA); todos gestionados por SPs) y el tercer nivel global se refiere a la gestión de los asuntos de Gobernanza, Legales y Financieros del TCS y la actividad de coordinación de la comunidad.

Con el fin de dar acceso virtual (AV) a las DDSS del VOLC-TCS a través del Portal de Datos EPOS, se ha dedicado gran esfuerzo a la definición de los metadatos de acuerdo con los estándares del EPOS ICS. Al principio se llevó a cabo un proceso de definición de metadatos asociando un modelo conceptual utilizado para crear una estructura de base de datos, en la que se almacena, gestiona y actualiza la información. Durante esta fase, también se implementó un catálogo de instalaciones del VOLC-TCS disponibles para acceso físico o remoto, basado en lo aprendido en los proyectos de la UE ENVRI PLUS (2015-2019; envriplus.eu) y EUROVOLC (2018-2021; eurovolc.eu) (Puglisi et al. 2022; Wessels et al. 2022). En cuanto a los aspectos legales relacionados con la provisión de DDSSs, VOLC-TCS adopta los criterios de Acceso Abierto y las Licencias definidas en la Política de Datos de EPOS (epos-eu.org/data-policy-2018). En el momento de redactar este documento, el VOLC-TCS ya ha expuesto parte de sus servicios a través del Portal de Datos EPOS (epos-eu.org/dataportal), lanzado oficialmente en la primavera de 2023. El Portal de Datos EPOS permite a los usuarios descubrir, visualizar y descargar datos de Ciencias de la Tierra de forma integrada. El portal es el resultado del trabajo colectivo de un equipo internacional de unos 600 expertos que trabajan en sinergia en la integración y armonización de más de 60 tipos diferentes de datos y metadatos de diversas disciplinas, puestos a disposición de los usuarios como datos y servicios EPOS (Bailo et al. 2023).

El VOLC-TCS prevé la implementación de otros servicios para ofrecer una cartera más amplia de DDSS vulcanológicos. Además, el VOLC-TCS está desarrollando el Volcano Observations Gateway (vo-tcs.ct.ingv.it/), que pretende superar la fragmentación de la comunidad vulcanológica y las infraestructuras ampliamente distribuidas mediante el desarrollo de conexiones y colaboraciones dinámicas dentro de la comunidad y entre la comunidad y sus partes interesadas. El Gateway (cuyo nombre final será EUROVOLC, como acrónimo de EUROpean VOLcanological Community) se ocupa de los volcanes europeos y propone un punto de acceso único para los DDSS vulcanológicos, tanto para los servicios conformes con EPOS como para aquellos servicios que no son totalmente conformes con los estándares EPOS pero que tienen una importancia significativa para la comunidad volcánica.

El VOLC-TCS de varios países cuyo potencial debería ser suficiente para contribuir en EPOS en este sentido. Principalmente hay dos países con actividad volcánica histórica en Europa como son Portugal y Grecia cuya fortaleza en el ámbito de la volcanología es indiscutible y con gran cantidad de datos y conocimiento de sus instituciones que podría compartirse en EPOS. Se espera que en los próximos años puedan unirse al menos como Proveedores de datos para completar así el conocimiento del volcanismo europeo a disposición de los usuarios de EPOS.

Finalmente hay que destacar la importancia de que los servicios en EPOS sigan los principios "FAIR" para garantizar la sostenibilidad en el futuro. Esto entona con la idea de la política de Datos Abiertos de la Unión Europea y los Gobiernos que la forman. Estos principios son 4:

- **FINDABLE** (Encontrables): Los datos y metadatos pueden ser encontrados por la comunidad después de su publicación, mediante herramientas de búsqueda. Deben tener identificador único y tener metadatos que los describan de manera precisa y permitan su búsqueda.
- **ACCESSIBLE** (Accesibles): Los datos y metadatos están accesibles y por ello pueden ser descargados por otros investigadores utilizando sus identificadores. Deben permitir ser encontrados mediante protocolos estándar de comunicación siendo los datos abiertos y gratuitos.
- **INTEROPERABLE** (Interoperables): Tanto los datos como los metadatos deben de estar descritos siguiendo las reglas de la comunidad, utilizando estándares abiertos, para permitir su intercambio y su reutilización. Deben usar un lenguaje formal accesible y compatible.
- **REUSABLE** (Reutilizables): Los datos y los metadatos pueden ser reutilizados por otros investigadores, al quedar clara su procedencia y las condiciones de reutilización.

Para poder lograr esto se deben validar cuatro aspectos:

- **Técnico:** Para poder generar unos metadatos que permitan la armonización de los servicios y la interoperabilidad con el ICS.
- **Gobernanza:** Deben existir una definición clara de funciones y responsabilidades en la gestión del servicio, tanto a nivel nacional como europeo.
- **Legal:** Los miembros deben estar conforme con las políticas de Datos Abiertos
- **Financiero:** EPOS debe adoptar un modelo de financiación y una estrategia adecuada.

EL PORTAL VOLC-TCS

El VOLC-TCS no incluye todas las instituciones europeas que se ocupan de la vulcanología. Para permitir el acceso a DDSSs de instituciones que no son ni DPs ni SPs, cuyos DDSSs aún no cumplen con los estándares de EPOS, o a DDSSs producidos por los DPs y SPs del TCS que aún no cumplen con los estándares de EPOS, se ha implementado una pasarela adecuada. La pasarela es complementaria al portal de datos EPOS. Con el fin de mejorar la utilidad del Portal de Datos para los usuarios, el VOLC-TCS decidió seguir el mismo modelo de datos y metadatos adoptado en el EPOS. La estrategia incluye: i) recopilar conjuntos de datos de diferentes dominios (por ejemplo, geoquímica, muestras de rocas, modelos numéricos volcánicos, mapas de peligrosidad) y caracterizados por campos de aplicación heterogéneos, ii) evaluar su nivel de madurez (es decir, su grado de conformidad con las normas EPOS), y iii) conectarlos al entorno más amplio de infraestructuras electrónicas existentes, RI, etc.

Esta solución para gestionar los DDSS no conformes con EPOS también ha sido adoptada con éxito por otros TCS. Para garantizar la sostenibilidad a largo plazo de un servicio, EPOS necesita un plan de trabajo específico y obligatorio para desarrollar y/o adaptar un DDSS genérico en un servicio EPOS (deben definirse las cuestiones técnicas, de gobernanza, jurídicas y financieras). La Pasarela VOLC-TCS, en cambio, puede ser independiente de la estrategia de implantación de EPOS y define sus propias estrategias. De hecho, aunque el Portal no puede garantizar la sostenibilidad a largo plazo, permite un mayor acceso a los datos o la información y probar su idoneidad para la comunidad vulcanológica. Por lo tanto, el Portal puede utilizarse para probar la utilidad o importancia de un servicio específico y, a continuación, evaluar la posibilidad de convertirlo en un DDSS que cumpla con EPOS.

En el momento de redactar el presente documento, la versión beta de la pasarela VOLC-TCS, planificada y desarrollada en el marco del proyecto EUROVOLC de la UE, ya está en funcionamiento (vo-tcs.ct.ingv.it/). La Pasarela está organizada en diferentes secciones, intrínsecamente conectadas (Figura 3): Lista de servicios, una lista detallada, en forma de tabla, que describe todos los DDSS VOLC-TCS conformes y no conformes con EPOS. Se puede acceder fácilmente a cada uno de estos servicios utilizando una página de aterrizaje dedicada; EduBoX, una lista de salida, referencia y tutorial; Lista de ENT expuestas en el proyecto EUROVOLC.

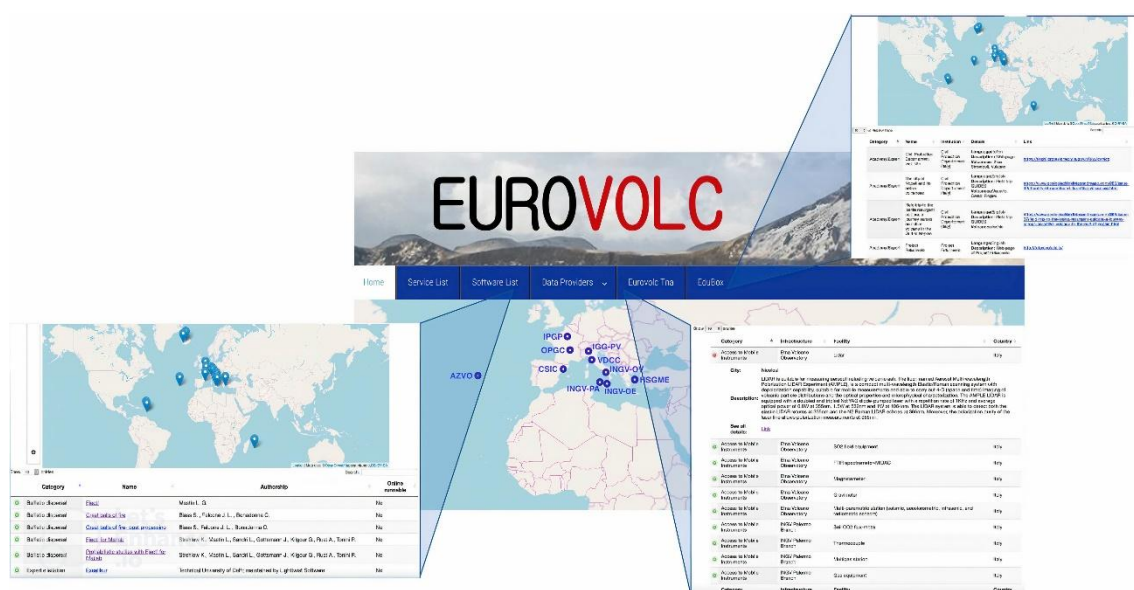


Figura 3: Versión real de la pasarela VOLC-TCS que muestra las tres capas diferentes, es decir, la lista de servicios, la EDUBOX y la lista TNA.

Tabla 1: Servicios actuales de VOLC-TCS. Obsérvese que los servicios en amarillo son los que son compatibles con EPOS y están expuestos en el Portal o en el Portal de Datos EPOS; los servicios en blanco son los que no son compatibles con EPOS y, por tanto, sólo son accesibles a través del Portal.

Service ID	Service Name	Category	Description	Service Provider
WP11-001	Seismic stations Guadeloupe Martinique Mayotte Reunion	Seismological Data	Seismic data from a specific region. Georeferenced data	IPGP
WP11-001	Seismic waveforms Guadeloupe Martinique Mayotte Reunion	Seismological Data	Seismic data from a specific region. Time series	IPGP
WP11-027	Mt. Etna Earthquake Parameters (2000-2019)	Seismological Data	Catalogue of earthquakes	INGV
WP11-027	Earthquake parameters from	Seismological Data	Catalogue of earthquakes	IPGP

Service ID	Service Name	Category	Description	Service Provider
	Guadeloupe, Martinique, Mayotte and La Reunion islands			
WP11-003	GNSS raw data Iceland	Geodetic data	Rinex data. Time series	IMO
WP11-003	GNSS station list Iceland	Geodetic data	Georeferenced data: GNSS list of stations	IMO
WP11-003	GNSS Site Logs in Iceland	Geodetic data	Georeferenced data: GNSS site logs	IMO
WP11-005	Tiltmeter waveforms Guadeloupe Martinique Reunion	Geodetic data	Georeferenced data: Time series	IPGP
WP11-005	Tiltmeters Guadeloupe Martinique Reunion station	Geodetic data	Georeferenced list of stations	IPGP
WP11-006	Tide stations Guadeloupe	Geodetic data	Georeferenced list of stations	IPGP
WP11-006	Tide waveforms Guadeloupe	Geodetic data	Tide data: Time series	IPGP
WP11-036	Collection of Magmatic Rocks and Samples from Piton de la Fournaise volcano, on Réunion island	Geochemical data	Georeferenced data: geochemical analysis	OPGC
WP11-036	Mt. Etna Bulk Rock Analysis	Geochemical data	Georeferenced data: geochemical analysis	INGV
WP11-050	Wrapped Differential Interferograms	Satellite data	Georeferenced data: images	INGV
WP11-050	InSAR Wrapped Interferogram over the Piton de la Fournaise Volcano	Satellite data	Georeferenced data: images	OPGC
WP11-047	Geostationary satellite derived Volcanic Ash and SO2 plumes products	Satellite data	Georeferenced data: images + timeseries	OPGC
WP11-049	Geostationary satellite derived Volcanic Thermal Anomalies products	Satellite data	Georeferenced data: images + timeseries	OPGC
WP11-051	Lava flow contour derived from InSAR data	Satellite data	Georeferenced data: images	OPGC
WP11-022	Ground based radar data Iceland	Ground based remote sensing data & products	Radar data Island	IMO
WP11-023	Ground based visible	Ground based remote	thermal/IR camera	IMO

Service ID	Service Name	Category	Description	Service Provider
	and thermal/IR camera Iceland	sensing data & products	Iceland	
WP11-024	Doppler radar near source eruptive parameters	Ground based remote sensing data & products	Doppler Data	OPGC
WP11-053	Ground based UV spectra (DOAS) Iceland	Ground based remote sensing data & products	Data from UV spectra (DOAS)	IMO
WP11-053	OPGC Doppler radar raw spectra	Ground based remote sensing data & products	Radar spectra	OPGC
WP11-031	Weekly Volcanic Report Iceland	Volcanological/petrological	volcanic report – georeferenced	IMO
WP11-031	Weekly Volcanic Report Italy	Volcanological/petrological	volcanic report – georeferenced	INGV
WP11-031	Reports on volcanic activity Guadeloupe Martinique Reunion	Volcanological/petrological	volcanic report – non georeferenced	IPGP
WP11-032	Volcano Observatory Notice for Aviation Iceland	Volcanological/petrological	volcanic notice – georeferenced	IMO
WP11-032	Volcano Observatory Notice for Aviation Guadeloupe Martinique Reunion	Volcanological/petrological	volcanic notice – non georeferenced	IPGP
WP11-032	Aviation colour codes for Icelandic volcanoes	Volcanological/petrological	volcanic notice – georeferenced	IMO
WP11-032	Volcano Observatory Notice for Aviation Italy	Volcanological/petrological	volcanic notice – georeferenced	INGV
WP11-033	Catalogue of Icelandic volcanic eruptions	Volcanological/petrological	volcanic catalogue – non georeferenced	IMO
WP11-026	Collection of Magmatic Rocks and Samples	Rock sample properties	volcanic samples – non georeferenced	OPGC
WP11-054	S02 probabilistic hazard maps Iceland	Geohazards	hazard maps	IMO
WP11-058	Tephra fallout hazard maps Iceland	Geohazards	Geohazards products: hazard maps	IMO
WP11-065	Daily ash/gas forecasting Iceland	Geohazards	Geohazards products: hazard maps	IMO
WP11-56	Susceptibility Maps Distribution	Geohazards	hazard maps for different Spanish volcanoes	CSIC
WP11-57	Lava flow invasion hazard maps	Geohazards	hazard maps for different Spanish volcanoes	CSIC
WP11-58	Tephra fallout hazard maps for explosive volcanoes	Geohazards	hazard maps for different Spanish volcanoes	CISC

Service ID	Service Name	Category	Description	Service Provider
WP11-59	PDCs Hazard maps	Geohazards	hazard maps for different Spanish volcanoes	CSIC
WP11-60	Probabilistic Hazard maps	Geohazards	hazard maps for different Spanish volcanoes	CSIC
WP11-070	Software catalogue Italy	Data services	list of different software	INGV
WP11-067	Station information Italy	Data services	List of stations	INGV
New Service	Volcanic eruption images from Iceland	Volcanological/petrological	volcano images – georeferenced	IMO
WP11-067	GNSS geodetic stations from Guadeloupe, Martinique, Mayotte and La Réunion Islands (IPGP)	Data services	List of stations	IPGP

REFERENCIAS

- [1] Bailo D, Paciello R, Michalek J et al (2023). The EPOS multi-disciplinary Data Portal for integrated access to solid Earth science datasets. *Sci Data* 10:784. <https://doi.org/10.1038/s41597-023-102697-9>
- [2] Fernandes R, Bruyninx C, Crocker P, Menut J.L, Socquet A, Vergnolle M, Avallone A, Bos M., Bruni S, Cardoso R, Carvalho L, Cotte N, D'Agostino N, Deprez A, Fabian A, Geraldès F, Janex G, Kenyeres A, Legrand J, Ngo K.M, Lidberg M, Liwosch T, Manteigueiro J, Miglio A, Soehne W, Steffen H, Toth S, Dousa J, Ganas G, Kapetanidis V, Batti G (2022). A new European service to share GNSS Data and Products. *Annals of Geophysics* 65:3 DM317. doi:10.4401/ag-8776
- [3] Haslinger F, Basili R, Bossu R, Cauzzi C, Cotton F, Crowley H, Custódio S, Danciu L, Locati M, Michelini A, Molinari I, Ottemöller L, Parolai S (2022). Coordinated and Interoperable Seismological Data and Product Services in Europe: the EPOS Thematic Core Service for Seismology. *Annals of Geophysics* 65:2 DM213. doi:10.4401/ag-8767
- [4] Puglisi G, Reitano D, Spampinato L, Vogfjörð KS, Barsotti S et al (2022). The integrated multidisciplinary European volcano infrastructure: from the conception to the implementation. *Annals of Geophysics* 65:3 DM320. <https://doi.org/10.4401/ag-8794>
- [5] Saleh Contell K, Karlzén K, Cocco M, Pedersen H.A, Atakan K, Bailo D, Lange O, Mercurio D, Maracchia G, Sangianantoni A, Piras D, Fredella M, Freda C (2022). Long-term sustainability of a distributed RI: the EPOS case. *Annals of Geophysics* 65: 2 DM209. doi:10.4401/ag-8786
- [6] Wessels R, ter Maat G, Del Bello E, Cacciola L, Corbi F et al (2022). Transnational access to facilities for Solid Earth Sciences: a service to promote multi-domain research in Europe. *Annals of Geophysics* 65:3 DM214. <https://doi.org/10.4401/ag-8768>

S.05

Meteorologia e Ciências Atmosféricas

Meteorología y Ciencias Atmosféricas

The Solar Irradiation Assessment and Mapping in Timor-Leste with ERA5, MERRA-2 and SOLCAST data

SARMENTO, Nelson ⁽¹⁾; POTES, Miguel ⁽²⁾; CANHOTO, Paulo ^(2,3)

(1) Universidade de Évora, Évora, Portugal.

(2) Centro de Investigação em Ciência e Tecnologia para o Sistema Terra e Energia (CREATE), Universidade de Évora, Évora, Portugal.

(3) Departamento de Engenharia Mecatrónica, Universidade de Évora, Évora, Portugal.

Corresponding author: m54038@alunos.uevora.pt

ABSTRACT

This work presents the solar resource assessment in Timor-Leste using reanalysis data from ERA5 and MERRA-2, involving a grid covering an area between 123.75° and 127.5° latitude and -9.5° and -8.0° longitude, over a period of 23 years (2000-2022). Additionally, SOLCAST data acquired at 39 points distributed across the grid and over 16 years (2007-2022), representing the municipalities of Timor-Leste, was also used in this analysis. First, the reanalysis data from ERA5 and MERRA-2 was subjected to an adjustment of the original grid to a resolution of 0.5° x 0.5° through bicubic and linear triangular interpolation, and subsequently to 0.01° x 0.01° to carry out the resource assessment and mapping. The results show that the comparison of the Global Horizontal Irradiance (GHI) under clear sky conditions for ERA5/MERRA-2 has a coefficient of determination of R^2 of 0.992, for ERA5/SOLCAST a R^2 of 0.930, and for MERRA-2/SOLCAST a R^2 of 0.943. On the other hand, the comparison of the GHI for all sky conditions show that for ERA5/MERRA-2 has a coefficient of determination R^2 of 0.386, for ERA5/SOLCAST has R^2 of 0.7136, and for MERRA-2/SOLCAST has 0.399. In addition, the influence of environmental conditions on solar irradiation was also investigated, resulting in the following relationships: for the MERRA-2 GHI for all sky conditions as a function of cloud cover fraction and precipitable water vapour content shows a good R^2 (64%) for both variable while for ERA5 it is below 10% for same cases. Such different of correlation values are explained by the different input of meteorological and climate data between two models. The monthly and annual maps of GHI resource for clear sky and all sky conditions using MERRA-2 data present higher mean irradiance levels than of ERA5.

KEYWORDS

Solar Irradiation, Assessment and mapping, ERA5, MERRA-2, SOLCAST and TIMOR-Leste

INTRODUCTION

Direct normal irradiation (DNI), diffuse horizontal irradiation (DHI), global horizontal irradiation (GHI) and global tilted irradiation (GTI) are the four solar irradiation components that have been extensively investigated for solar energy project design and operation. Nowadays, there are three main methods for gathering data on solar surface irradiance (SSI): ground-based observation, reanalysis utilizing large data assimilation systems and modelling, and satellite observation (remote sensing)(Liang et al., 2019).

The measurement of GHI and DHI through ground-based stations is conducted using an unobstructed pyranometer and a shaded pyranometer, respectively. The DNI assessment is conducted using a pyrliometer and a sun tracking system. These devices are fitted in accordance with ISO 9060:1980 and calibrated according ISO 9748:1993 to guarantee traceability(ISO, 1990)(McArthur, 2005)(MANAK BHAVAN, 2013) and follow the WMO guide. Furthermore, radiation is filtered according to the Baseline Surface Radiation Network standard. The standard requires the filtration of solar irradiance data according outlined below: In the possible physical limits, all irradiance components minimum is -4W/m^2 , maximum admissible GHI is $1.5\text{Ga}\cos(Z)+100\text{W/m}^2$, the maximum DHI is $0.95\text{Ga}\cos(Z)+50\text{W/m}^2$, and the maximum DNI is $\text{Ga}\text{W/m}^2$; while, in the extremely rare limits, the minimum irradiance of all components is -2W/m^2 , and the maximum admissible GHI is $1.2\text{Ga}\cos(Z)+50\text{W/m}^2$, the maximum DHI is $0.75\text{Ga}\cos(Z)+30\text{W/m}^2$, and the maximum DNI is $0.95\text{Ga}\cos(Z)+10\text{W/m}^2$, where $G_a = \frac{G_o}{AU^2}$, G_o is the solar constant on the top of atmosphere and AU is the distance to the Sun in Astronomical Units, and Z is solar zenith angle (Long & Dutton, 2002).

Field-measured data are often more reliable and indicate the atmosphere and site-specific solar irradiation conditions. Consequently, utilizing these data permits precise sizing of renewable energy systems, which increases efficiency and energy output. Inversely, regarding funding and resources, it has challenged to get, sustain, and maintain an extensive database across

several locations due to the higher costs and maintenance issues associated with the equipment. In remote locations with a limited number of observation sites, local ground-based measurements only are inadequate to accurately represent the spatial distribution characteristics of surface solar radiation (Huang et al., 2019).

Besides the observations from ground-based stations, solar irradiance at the surface can also be obtained through numerical weather prediction (NWP) models. According to (Dodla, 1995), NWP modelling is a reliable method used to estimate future atmospheric conditions based on numerical solution of a physical model of the atmosphere. This requires a realistic and more detailed description of atmospheric circulation and consists of several independent mathematical equations that can be solved by knowing analytical or numerical methods. Atmospheric circulation is represented by the principles of conservation of momentum, mass and energy. Mathematical equations in NWP are non-linear partial differentials, therefore the solution is a method of approximating derivatives by finite differences. The approximations are carried out on discrete grids in four dimensions (three dimensions for space and one for time) and their solution can be obtained at each point or in a set of points on the grid. Within the grid, horizontal coordinates are represented by grid points while the vertical coordinate requires an appropriate definition of the structure of the atmosphere. There are several approaches to the vertical coordinate, including a coordinate system based on pressure and height, land surface pressure, mean sea level pressure and hybrid coordinates. NWP can be carried out in a global model or within a limited area. Global models solve equations for the entire planet, while the limited-area model is focused on specific locations and provides short-range forecasts with greater spatial and temporal resolution and requires the definition boundary conditions for that limited area. Reanalysis data, which is obtained from numerical weather prediction models run for the past with ground-based data assimilation, is widely used. Its biggest limitation lies in model errors in simulating or parametrization of cloud cover. Consequently, the quality of surface solar irradiation products from NWP modelling, especially high spatial and temporal resolution products, must be analysed and carefully, mainly because a monthly aerosol climatology is used instead of a more detailed description of the atmospheric constituents (Pereira et al., 2022). There are currently several reanalysis projects that provide solar irradiation data based on climate models and observations, including ERA5 from ECMWF, MERRA-2 from the NASA Global Modelling and Assimilation Office, NCEP/NCAR from the national center for environmental prediction, CFSR from NOAA, and JRA-55 from the Japan Meteorological Agency (Hersbach et al., 2020) (Merra- et al., 2020) (R- et al., 2002) (Saha et al., 2010) (Kobayashi et al., 2015).

Furthermore, solar irradiation at the surface can also be estimated from satellite remote sensing data. Satellites offer tools to observe, measure, and understand meteorological phenomena and the energy balance through radiative transfer. In the case of solar radiation, sensors on board a meteorological satellite receive short-wavelength radiation that passes through the atmosphere and interacts with various atmospheric constituents, such as clouds, aerosols, and water vapor and ice, as well as the surface albedo. Solar irradiation at the surface is estimated through statistical, physical, and empirical and semiempirical methods. Currently, seven meteorological satellites perform these measurements, such as Himawari-8, Insat-3c, Meteosat-10D, Meteosat-MSG, Geos-13, Geos-14, and Geos-15. Satellite-derived surface irradiance databases are provided by numerous institutions for commercial and open access purposes. Commercial providers include Meteotest, Reunivatt, SoDa-Transvalor, Solargis, SolarAnywhere, Solcast, Vaisala, and Vortex (Huang et al., 2019) (Gueymard, 2022) (Sanfilippo, 2019).

Timor-Leste's strategic national development plan underscores the relevance of renewable energy sources as the best alternative to fossil fuels, with a prospective contribution of installed capacity up to 450 MW, including 22 MWp from solar photovoltaic energy capacity (Timor-Leste, 2011). In consideration of the recent variations in oil prices, the *Eletricidade de Timor-Leste* company has published its conviction that solar energy can possibly decrease the average cost of electric energy in Timor-Leste (EDTL-EP, 2022). In 2021, the government has apparently launched a tender for a 100 MWp solar power plant (Pires, 2021). Regarding this plan, there is a need for more detailed solar irradiation studies and assessment in this region. According to (Song et al., 2023) (Zell et al., 2015) accurate assessment of solar irradiation availability, in terms of spatial and temporal distribution characteristics and availability, is essential in solar energy fields. This evaluation aids in selecting solar technology, project concessions, estimating energy uncertainty, securing funding, financing solar projects, and calculating payback periods. Based on the reasons stated, the objective of this work is to assess and map the solar resource in Timor-Leste using reanalysis data from ERA5 and MERRA-2 and the SOLCAST model. The effects of altitude, precipitable water vapour, and cloud cover fraction on global horizontal irradiation (GHI) is also analysed. The Copernicus climate data store provides ERA5 data, the NASA GES DISC portal provides MERRA-2 data, and the SOLCAST portal provides SOLCAST data.

METHODOLOGY

The area under study comprises the region between latitudes -9.5° and -8.0° and longitudes between 123.75° and 127.5° using a

23-year period (2000-2022) for ERA5 and MERRA-2 reanalysis data, while for SOLCAST models were collected at 39 locations around the municipality in Timor-Leste over a 16-year period (2007-2022). The data was statistically analysed to obtain long-term monthly and annual averages. The calculations were performed using the following equation

$$\overline{H_j} = \frac{1}{23} \sum_{i=1}^{23} H_{ij} \quad (1)$$

Where $\overline{H_j}$ is a long-term monthly average for a given month (kWh/m²/day), H_{ij} is the monthly irradiation of month (**j**) and year (**i**). The long-term annual average was calculated as shown in equation below:

$$\overline{Y} = \frac{1}{23} \sum_{i=1}^{23} \sum_{j=1}^{12} H_{ij} \quad (2)$$

Where $\overline{Y}$ is average annual solar irradiation (kWh/m².year). All data was then processed with a geographical information software (QGIS) for resource assessment and mapping. Due to the different spatial resolutions of the three sources, it was necessary to adjust the ERA5 and MERRA-2 data from their original spatial resolution to 0.5° x 0.5° and then to 0.01° x 0.01° for evaluation. These adjustments are made through bicubic triangular interpolation with QGIS. The solar irradiation mapping was performed using the ERA5 and MERRA-2 data. For this, the data were also subjected to an original grid adjustment for the 0.01° x 0.01° spatial resolution. The purpose of this procedure was, on one hand, to maximize spatial resolution allowing for a greater sharpness of irradiation and mainly, on the other hand, to reduce data to the same grid resolution in order to better compare different data sources. The mapping is run by means of triangular linear interpolation and with the aid of the QGIS software. Interpolation is generated for a grid frame between latitude [-9.905, -7.874] and longitude [123.654,127.663], with the referential system [EPSG:4326]. The influence of the altitude in GHI, cloud cover fraction and precipitable water vapour was carried out by selecting different points in the region, as shows in the map below:

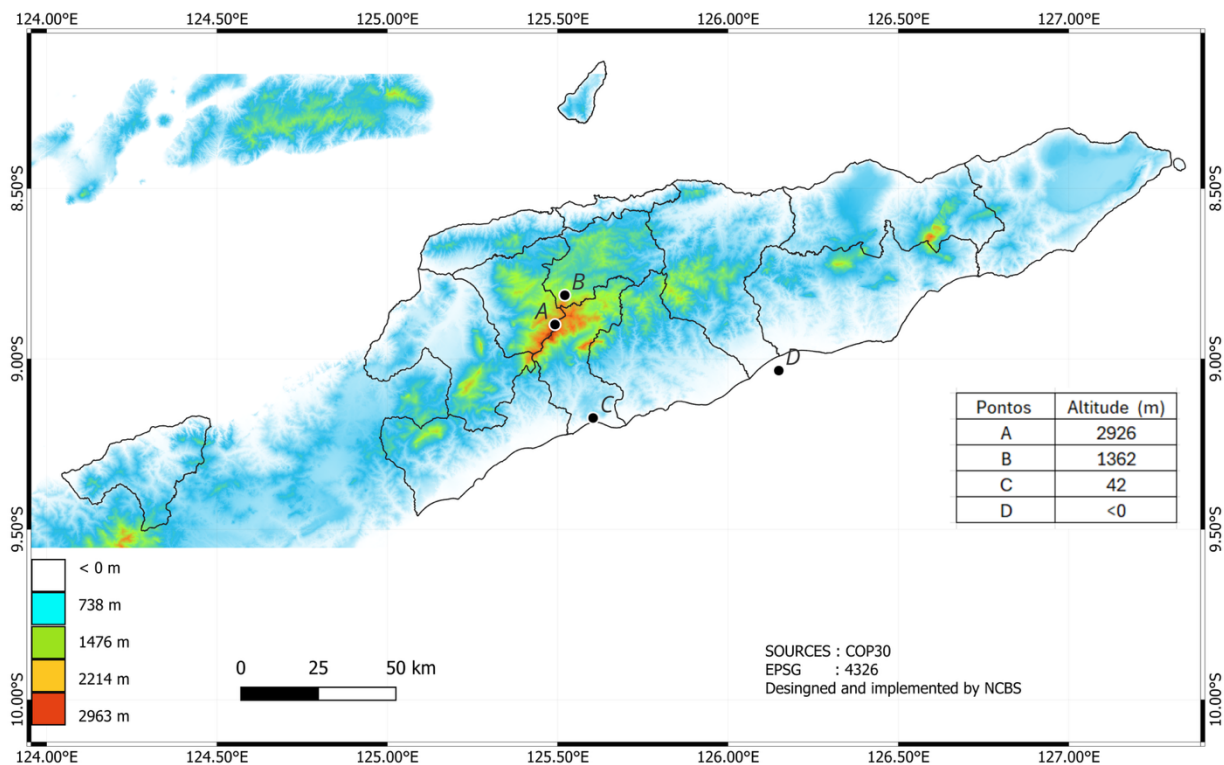


Figure 1: Timor-Leste digital elevation model and position and altitude of the selected points A, B, C and D.

RESULTS

GLOBAL HORIZONTAL IRRADIATION FOR CLEAR SKY AND UNDER ALL SKY CONDITIONS

Global Horizontal Irradiation for clear sky

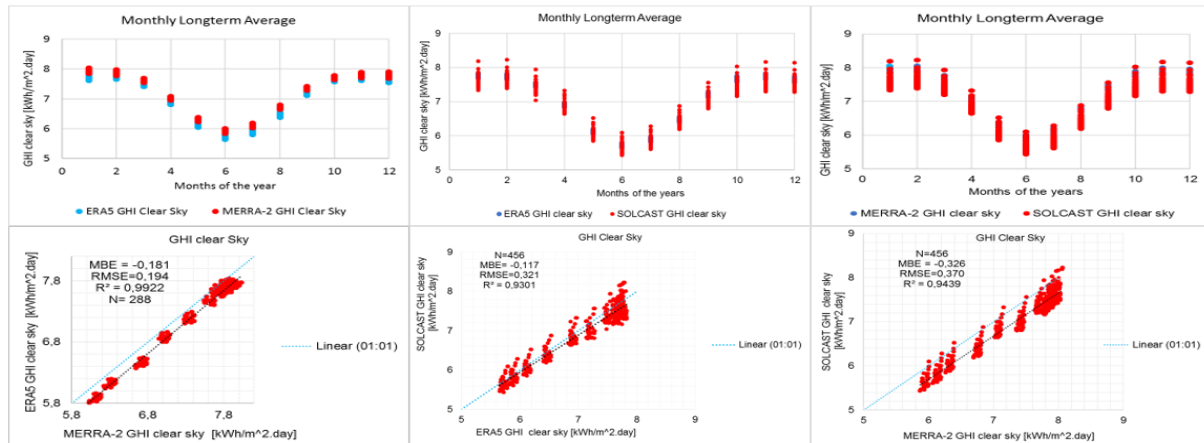


Figure 2: Scatter plots of Global Horizontal Irradiation (GHI) for clear sky for comparison between ERA5, MERRA-2 and SOLCAST.

The ERA5 and MERRA-2 clear sky GHI exhibit a systematic difference, which is revealed by a mean bias error (MBE) of $-0.181 \text{ kWh/m}^2.\text{day}$, a root means square error (RMSE) of $0.194 \text{ kWh/m}^2.\text{day}$, and a coefficient of determination (R^2) of 0.9922 , taking the MERRA-2 as reference. The results indicate that ERA5 underestimates MERRA-2 data, however the comparison of these two datasets exhibits a low error and a high coefficient of determination, demonstrating a strong similarity between the two models. For ERA5/SOLCAST the results show a MBE of $-0.117 \text{ kWh/m}^2.\text{day}$, a RMSE of $0.321 \text{ kWh/m}^2.\text{day}$ and a $R^2 = 0.9301$. This shows that on averages SOLCAST underestimates ERA5, and that the coefficient is rather smaller compared to ERA5/MERRA-2, but the two models still explain a large amount of variability. This is to be expected because the SOLCAST data are in points and the grid is much lower. The comparison results of MERRA-2/SOLCAST indicate an MBE of $-0.326 \text{ kWh/m}^2.\text{day}$, a RMSE of $0.370 \text{ kWh/m}^2.\text{day}$, and a R^2 value of 0.9439 . This indicates that, on average, SOLCAST also underestimates MERRA-2, exhibiting a greater mean bias error compared to the prior two, while still demonstrating a higher coefficient of determination. The MBE difference is expected due to the differing grids of the two models.

Global Horizontal Irradiation for all sky conditions

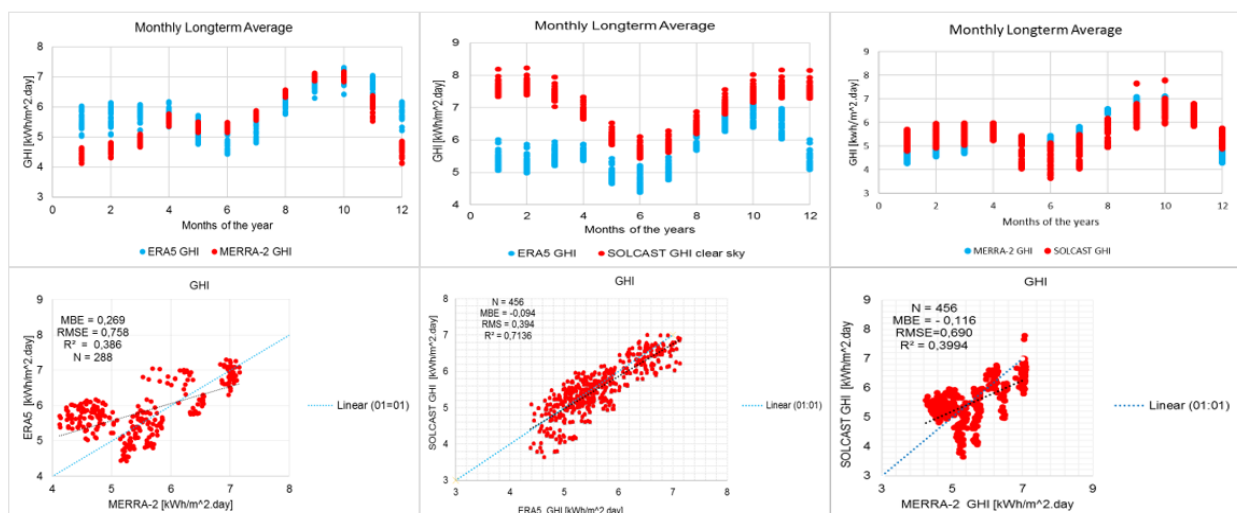


Figure 3: Scatter plots of Global Horizontal Irradiation (GHI) for all sky conditions for comparison between ERA5, MERRA-2 and SOLCAST.

The results of ERA5/MERRA-2 show that the MBE in this case is $0.269 \text{ kWh/m}^2.\text{day}$, the RMSE is $0.758 \text{ kWh/m}^2.\text{day}$ and R^2 is 0.386 .

The results of this comparison point out that ERA5 overestimates MERRA-2 in rainy periods, november to april, and underestimates in the dry period, May to October. The mean square error is high and the coefficient of determination low which can be attributed to the different assimilation of climate data, in this case the cloud fraction. Results of ERA5/SOLCAST show that the MBE is -0.094 kWh/m².day, the RMSE is 0.394 kWh/m².day and the R² is 0.7136. With this, it is considered that on average the SOLCAST slightly underestimates the ERA5, with error and relatively small and the variability between the two is explained in 71.4% of cases, indicating a good fit between the two models. According to the MERRA-2/SOLCAST results shown in the graphs, the MBE is -0.116 kWh/m².day, the RMSE is 0.690 kWh/m².day and the R² is 0.3994. This means that MERRA-2 underestimates SOLCAST in the rainy season (December to April) and overestimates it in the dry season, with a high error and a low coefficient of determination.

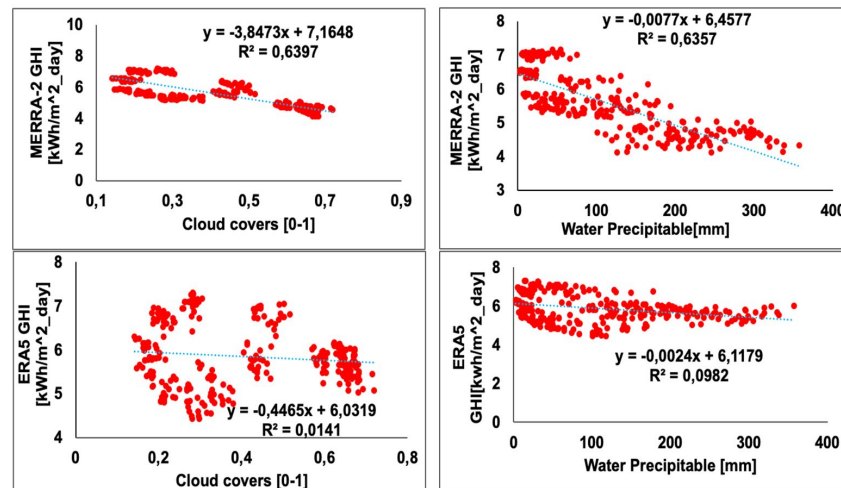


Figure 4: Scatter plots between global horizontal irradiance (GHI) for all sky conditions, precipitable water

Effect of cloud cover and precipitable water vapour on global horizontal irradiation

The result in Figure 4 shows that GHI from MERRA-2 has a strong correlation with cloud cover fraction in the order of 64% and ERA5 very low correlation, is in the order of 1.4%. This justifies the differences in the horizontal global irradiance data between ERA5 and MERRA-2, mainly in the rainy and dry periods of the study area.

As can be seen in the plots, the dispersion between the GHI from ERA5 and precipitable water vapour has also a very low coefficient of determination of 0.098, and the dispersion between the GHI from the MERRA-2 and precipitable water vapour has a coefficient of determination of 0.636.

The differences in correlation values between two models are explained by different inputs of meteorological and climate data between two models. And on the other hand, due to the cloud cover fraction data sources come from MERRA-2 and precipitable water from ERA5.

EFFECT OF ALTITUDE ON MODEL'S COMPARISON

The comparison of clear sky GHI between SOLCAST/ERA5 and between SOLCAST/MERRA-2 (Table 1) show that R² decreases as the altitude decreases, with exception for SOLCAST/MERRA in the location A. At locations A and B, ERA5 presents a MBE of 0.629 kWh/m².day and 0.218 kWh/m².day, and a RMSE of 0.63 kWh/m².day and 0.221 kWh/m².day, respectively, while MERRA-2 has a MBE 0.342 kWh/m².day and -0.047 kWh/m².day with a RMSE of 0.347 kWh/m².day and 0.054 kWh/m².day, respectively. For locations C and D, ERA5 has a MBE of -0.254 kWh/m².day and -0.346 kWh/m².day and a RMSE of 0.263 kWh/m².day and 0.354 kWh/m².day, respectively, while MERRA-2 has a MBE of -0.511 kWh/m².day and -0.494 kWh/m².day with a RMSE of 0.514 and 0.496, respectively. Therefore, for GHI for clear sky conditions at high-altitude locations, in point A and B in this case, MERRA-2 is subestimate in terms of average bias and quadratic mean error than ERA5. However, ERA5 subestimate MERRA-2 in terms of coefficient of determination. At low altitude, the case of locations C and D, ERA5 subestimate MERRA-2 in terms of quadratic mean error, and coefficient of determination but not in average bias.

Table 1: Comparison of GHI for clear sky and all sky conditions for different altitudes.

SOLCAST/ERA5					
Variables	Altitudes [m]	Altitude designation	MBE [kWh/m ² _day]	RMSE [kWh/m ² _day]	R ²
GHI clear sky	2926	A	0.629	0.623	0.999
	1362	B	0.218	0.221	0.9989
	42	C	-0.254	0.263	0.952
	0	D	-0.346	0.345	0.9929
GHI	2926	A	0.402	0.42	0.9868
	1362	B	0.188	0.294	0.8773
	42	C	0.104	0.274	0.917
	0	D	-0.059	0.192	0.946
SOLCAST/MERRA-2					
GHI clear sky	2926	A	0.342	0.347	0.997
	1362	B	-0.047	0.054	0.9978
	42	C	-0.511	0.514	0.9952
	0	D	-0.494	0.496	0.9952
GHI	2926	A	0.131	0.421	0.7544
	1362	B	-0.093	0.239	0.972
	42	C	-0.005	0.779	0.2765
	0	D	-0.039	0.771	0.2925

For GHI comparison between models, ERA5 indicates that the mean bias and mean squared error decrease with elevation. In MERRA-2, the mean bias reduces with elevation taking the ERA5 as reference, while the mean squared error increases at lower altitudes. Moreover, excluding location B, the ERA5 coefficient of determination remains consistent. The coefficients of determination for MERRA-2 are significantly lower at low altitudes and considerably higher at greater altitudes. As a result, ERA5 outperforms MERRA-2 in terms of mean bias, mean squared error, and coefficient of determination across various altitudes.

EFFECT OF CLOUDS AND PRECIPITABLE WATER VAPOUR ON MODEL'S COMPARISON AT VARIOUS ALTITUDES.

The result in the Table 2 shows that the cloud cover fraction of the ERA5 records a decrease in coefficient of determination as it decreases altitude. For MERRA-2 the coefficients of determination remain similar between altitudes with values between 0.567 and 0.592. The variability of GHI as a function of precipitable water vapour for the MERRA-2 model shows higher coefficient of determination at low altitudes locations designated as C and D. For ERA5 records low and similar determination coefficient values for altitudes locations A, B, and C, however in the coastline, location D, there was higher R².

Table 2: Comparison between GHI and precipitable water vapour and cloud cover.

HI vs Cloud Cover Fraction			
Altitudes [m]	Altitude designation	ERA5	MERRA-2
		R ²	R ²
2926	A	0.752	0.5707
1362	B	0.1397	0.5924
42	C	0.0071	0.5669
0	D	0.0011	0.586

GHI vs Precipitable Water			
Altitudes [m]	Altitude designation	ERA5	MERRA-2
		R ²	R ²
2926	A	0.1752	0.6569
1362	B	0.1918	0.6556
42	C	0.1845	0.8474
0	D	0.3216	0.9035

MAP OF GHI LONG TERM MONTHLY AVERAGE

GHI FOR CLEAR SKY

Due to the large number of maps, three monthly average maps were selected, two from the rain season and one of the dry seasons, to present in this section, namely January, March, and July, respectively.

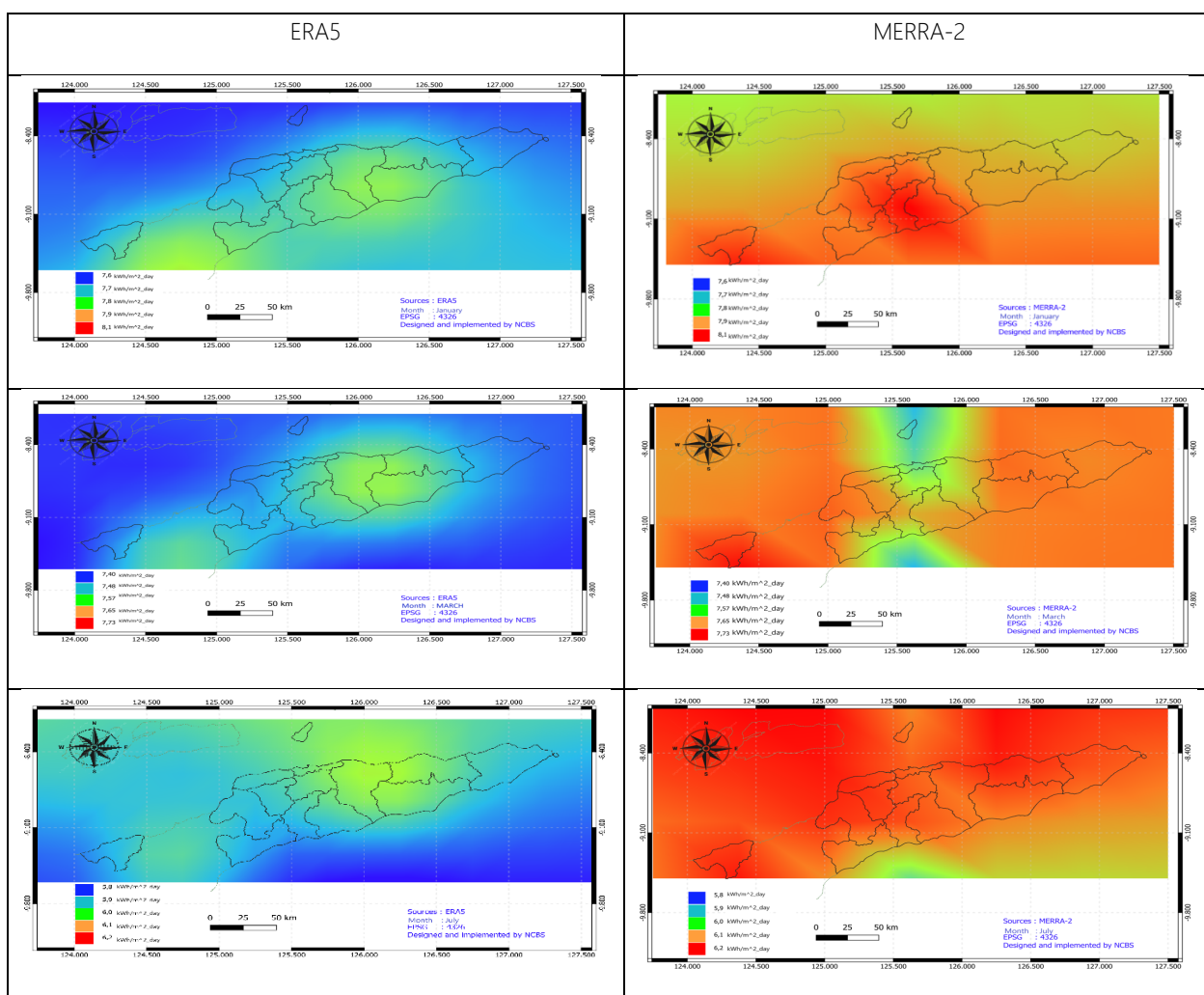


Figure 5: Monthly average maps of global horizontal irradiance for clear sky.

Long-term monthly average maps of global horizontal irradiance for clear sky conditions show that the spatial distribution of data from MERRA-2 has higher values than that of ERA5. From January to December, ERA5 shows significantly higher solar irradiance at higher elevation locations. On the other hand, MERRA-2 only shows similar distribution for the month of January. For the months from February to April and September to December, the MERRA-2 presents the highest irradiation between east and west

of Timor territory and lower irradiation in high mountain zones.

GHI under ALL SKY conditions

Three monthly average maps were also selected, one from the rain season one of the transition seasons and one of the dry seasons be to presented in this section, namely January, May, and July, respectively.

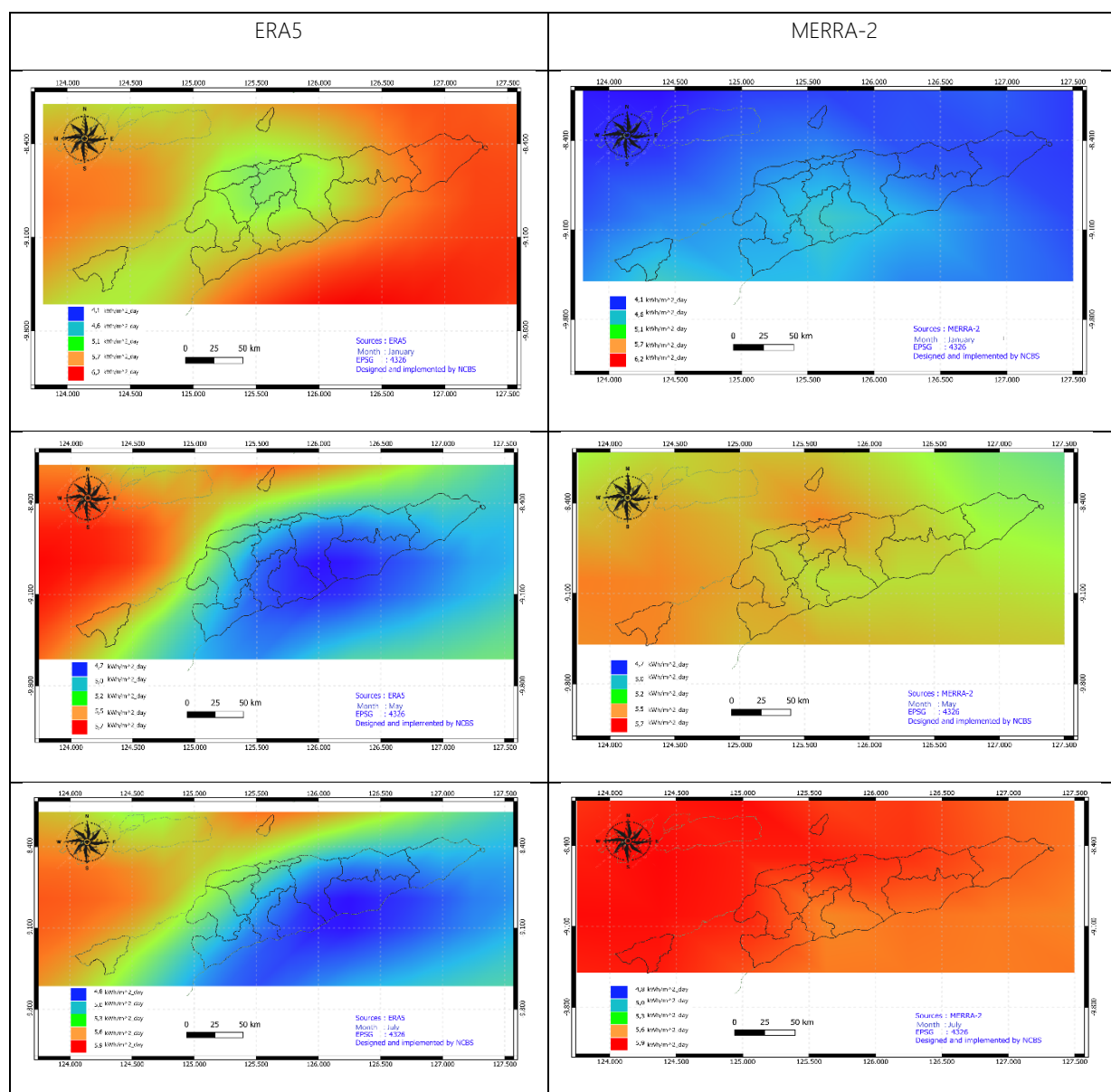


Figure 6: Monthly average maps for the global horizontal irradiance under all sky conditions.

The maps in the Figure 6 indicate that during the months of January, ERA5 exhibits greater irradiation compared to MERRA-2. From July, the MERRA-2, the irradiation levels exceed the values from ERA5 over the grid considered in this work. ERA5 presents lower irradiation levels in higher elevation zones from January to April and September to December. In the case of January and March, MERRA-2 presents the opposite distribution.

MAP OF GHI LONG TERM ANNUAL AVERAGE GHI FOR CLEAR SKY

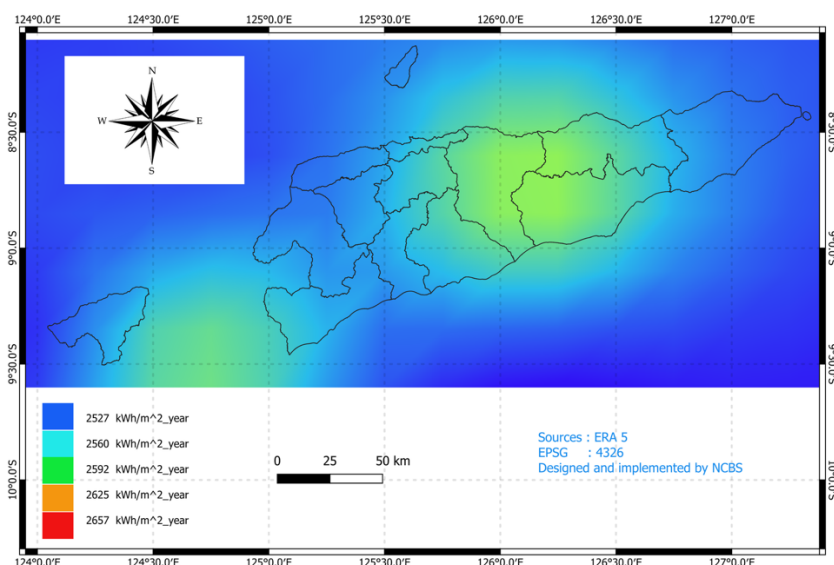


Figure 7: Annual average global horizontal irradiance in clear sky from ERA5.

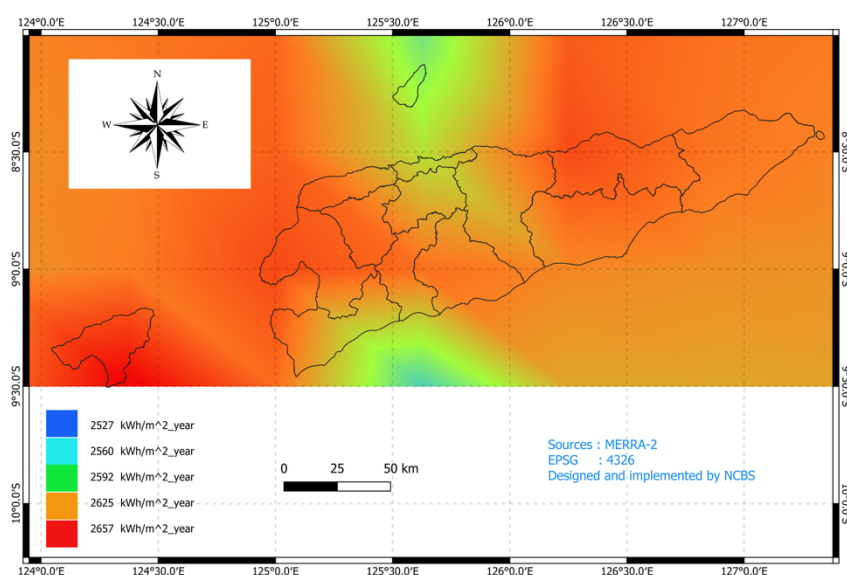


Figure 8: Annual average global horizontal irradiance in clear sky from MERRA-2.

The long-term annual average maps of Global Horizontal Irradiation for clear sky from ERA5 ranges from 2527 to 2592 kWh/m².year while from MERRA-2 from 2592 to 2657 kWh/m².year. As the maps above shows, the annual irradiation of MERRA-2 is higher than ERA5. The annual map of ERA5 shows higher irradiation in the central area of the territory and the western and eastern regions with lower solar irradiation. This is in accordance with monthly average maps from January to December of ERA5. The MERRA-2 annual average shows the highest solar irradiation in the eastern and western parts of the territory and lower irradiation in the central area of the territory with exception for the mountain area. This distribution is also evident in most of the monthly MERRA-2 maps.

GHI under ALL SKY conditions

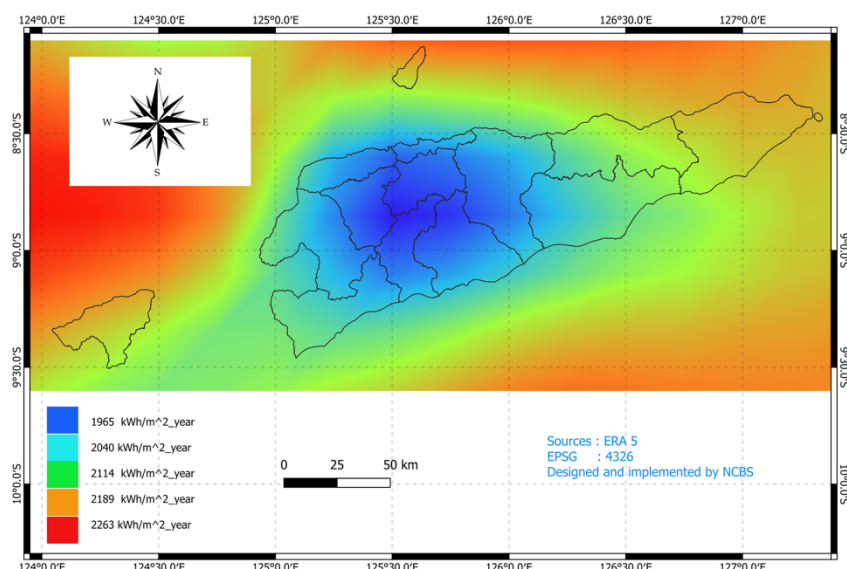


Figure 9: Annual average global horizontal irradiance all sky from ERA5.

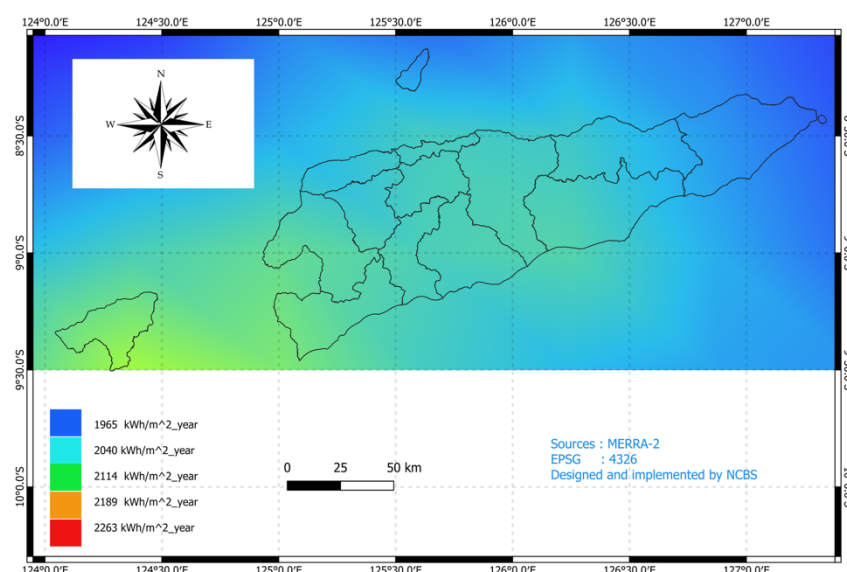


Figure 10: Annual average global horizontal irradiance all sky from MERRA-2.

The average annual value of the global horizontal irradiation under all sky conditions for ERA5 ranges from 1970 to 2263 kWh/m².year, while for MERRA-2 is from 1965 to 2212 kWh/m².year. To use the same colour scale on the other two maps above, the minimum MERRA-2 and the maximum of ERA5 were used as limits of the colour scale. To note that, comparing the annual values of ERA5 and MERRA-2 in the maps for the area under study, the annual global horizontal irradiation of the two models presents different distributions. For ERA5 around the island of Timor there is a negative gradient from the ocean towards the centre of the island, the highest altitude area, possibly showing the effect of the mountains. In the case of MERRA-2, the global horizontal irradiation is lower in the ocean and in the eastern part of the island and increases when approaching the centre of the island. This differences due to ERA5's finer spatial resolution and the use of an advanced global elevation model, which represents more detailed and accurate orography. Although MERRA-2 also assimilates orographic data, it's very low resolution prevents it from capturing the details of the reliefs and their effects.

CONCLUSION

The comparison between the three data sources one can verify a higher agreement between SOLCAST and ERA5 for GHI under all sky conditions ($R^2 = 0.7136$) and GHI for clear sky ($R^2 = 0.93$), and a lower agreement between the GHI from ERA5 and MERRA-2 and between SOLCAST and MERRA-2. The dispersion of GHI as a function of the fraction of cloud coverage and precipitable water vapour content has a R^2 value of the order of 64% for the MERRA-2 data while for ERA5 is below 10%. The differences in correlation values between two models are explained by different inputs of meteorological and climate data between two models. And on the other hand, due to the cloud cover fraction data sources come from MERRA-2 and precipitable water from ERA5. For different altitudes the comparison between SOLCAST and ERA5 and MERRA-2 has better results for location b (1392 m) for GHI for clear sky and GHI under all sky conditions except in the comparison SOLCAST/ERA5 which is best for location d (0 m). In the comparison of GHI with the cloud cover fraction and with precipitable water vapour, the results are best for the MERRA-2 model. The monthly and annual maps of GHI for clear sky and under all sky conditions of MERRA-2 present higher irradiance than of ERA5. This difference is expected due to the different inputs from meteorological, land cover, and topographic data of each model.

REFERENCES

- Dodla, V. B. R. (1995). *Numerical Weather*. Taylor & Francis. <https://doi.org/10.1201/9781003354017>
- EDTL.EP. (2022). *PRODUCTION AND RENEWABLE*. Website EDTL.EP. <https://www.edtl-ep.tl/departament/en/2979994931093398343150/>
- Gueymard, C. A. (2022). 1.10 - Solar Radiation Resource: Measurement, Modeling, and Methods. In *Comprehensive Renewable Energy, Second Edition: Volume 1-9* (2nd ed., Vol. 1, Issue August). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819727-1.00101-1>
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., ... Thépaut, J. N. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Huang, G., Li, Z., Li, X., Liang, S., Yang, K., Wang, D., & Zhang, Y. (2019). Estimating surface solar irradiance from satellites: Past, present, and future perspectives. *Remote Sensing of Environment*, 233(July), 111371. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111371>
- ISO. (1990). *STANDARD: Solar energy - Specification and classification of instruments for measuring hemispherical solar and direct solar radiation* (Vol. 1960).
- Kobayashi, S., Ota, Y., Harada, Y., Ebata, A., Moriya, M., Onoda, H., Onogi, K., Kamahori, H., Kobayashi, C., Endo, H., Miyaoka, K., & Kiyotoshi, T. (2015). The JRA-55 reanalysis: General specifications and basic characteristics. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 93(1), 5–48. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2015-001>
- Liang, S., Wang, D., He, T., & Yu, Y. (2019). Remote sensing of earth's energy budget: synthesis and review. *International Journal of Digital Earth*, 12(7), 737–780. <https://doi.org/10.1080/17538947.2019.1597189>
- Long, C. N., & Dutton, E. G. (2002). BSRN Global Network recommended QC tests, V2.0. *Baseline Surface Radiation Network*, 1–3.
- MANAK BHAVAN, B. S. Z. M. N. (2013). *Indian Standard SOLAR ENERGY — CALIBRATION OF FIELD PYRANOMETERS BY COMPARISON TO A* (Issue May).
- McArthur, L. B. J. (2005). Baseline Surface Radiation Network (BSRN): Operations Manual (Version 2.1). *Climate Research*, April, 9–13. https://epic.awi.de/id/eprint/30644/1/McArthur_2005.pdf
- Merra-, V., Gelaro, R., Mccarty, W., Suárez, M. J., Todling, R., Molod, A., Takacs, L., Randles, C., Darmenov, A., Bosilovich, M. G., Wargan, K., Coy, L., Cullather, R., Draper, C., Koster, R., Lucchesi, R., Merkova, D., Nielsen, J. E., & Partyka, G. (2020). *NASA Public Access*. 30(June 2014), 5419–5454. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0758.1>
- Pereira, S., Abreu, E. F. M., Iakunin, M., Cavaco, A., Salgado, R., & Canhoto, P. (2022). Method for solar resource assessment

using numerical weather prediction and artificial neural network models based on typical meteorological data: Application to the south of Portugal. *Solar Energy*, 236(January), 225–238. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.03.003>

Pires, H. E. A. R. Q. S. (2021). *THE DEMOCRATIC REPUBLIC OF TIMOR-LESTE HIGH-LEVEL DIALOGUE ON ENERGY VIDEO TRANSCRIPTION OF Minister of Public Works* (Issue September).
https://www.un.org/sites/un2.un.org/files/2021/09/timor_leste_e.pdf

R-, R., Kanamitsu, B. Y. M., Ebisuzaki, W., Jack, W. O. O. L. E. N., Yang, S., Hnilo, J. J., Fiorino, M., & Potter, G. L. (2002). *Ncep-doe amip-ii reanalysis (r-2)*. November. <https://doi.org/10.1175/BAMS-83-11>

Saha, S., Moorthi, S., Pan, H. L., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., Tripp, P., Kistler, R., Woollen, J., Behringer, D., Liu, H., Stokes, D., Grumbine, R., Gayno, G., Wang, J., Hou, Y. T., Chuang, H. Y., Juang, H. M. H., Sela, J., ... Goldberg, M. (2010). The NCEP climate forecast system reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91(8), 1015–1057.
<https://doi.org/10.1175/2010BAMS3001.1>

Sanfilippo, J. P. L. M.-P. A. (2019). Solar Resources Mapping. In *Green Energy and Technology*. Springer.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-97484-2_12

Song, Z., Cao, S., & Yang, H. (2023). Assessment of solar radiation resource and photovoltaic power potential across China based on optimized interpretable machine learning model and GIS-based approaches. *Applied Energy*, 339(March), 121005.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121005>

Timor-Leste, G. (2011). *Plano-Estrategico-de-Desenvolvimento_PT1*. 277.
https://timor-leste.gov.tl/wp-content/uploads/2012/02/Plano-Estrategico-de-Desenvolvimento_PT1.pdf

Zell, E., Gasim, S., Wilcox, S., Katamoura, S., Stoffel, T., Shibli, H., Engel-Cox, J., & Subie, M. Al. (2015). Assessment of solar radiation resources in Saudi Arabia. *Solar Energy*, 119, 422–438. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.06.031>

Effect of a volcanic plume event in the local shortwave radiative forcing (Évora, Portugal)

SALGUEIRO, Vanda ⁽¹⁾; COSTA, Maria João ⁽¹⁾; GUERRERO-RASCADO, Juan Luis ⁽²⁾, BORTOLI, Daniele ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Center for Sci-Tech Research in Earth System and Energy (CREATE), University of Évora, Portugal.

⁽²⁾ Andalusian Institute for Earth System Research and App. Phy. Dep., University of Granada, Spain.

Corresponding author: vsalgueiro@uevora.pt

SUMMARY

Atmospheric aerosols, such as the ones emitted by volcanos, interact directly with solar radiation through scattering and absorption processes affecting the Earth's radiative balance. This work aims to assess the local shortwave radiative effects produced by a volcanic plume transported over the city of Évora (Portugal) during the Tajogaite volcano (Canary Islands) eruptive activity in 2021. The shortwave (SW) aerosol radiative effects (radiative forcing and heating rates) are assessed using radiative transfer modelling. The radiative fluxes are computed at different vertical levels using the measured aerosol properties (e.g., vertical profiles of extinction coefficient) as inputs for the model. Results show a negative signal of the SW aerosol radiative forcing along the vertical profile and a maximum value of the mean SW radiative heating rate of $0.43 \pm 0.06 \text{ K.day}^{-1}$ translating a warming effect of the atmosphere. Results also show warming and cooling effects, respectively, at the top of the atmosphere and surface levels.

KEYWORDS

Aerosol radiative effects, SW aerosol radiative forcing, SW radiative heating rates, volcanic aerosols, radiative transfer modelling, Libradtran.

INTRODUCTION

Atmospheric aerosols are short-lived particles of natural or anthropogenic origin that interact directly with solar radiation through scattering and absorption processes, as well as indirectly by altering the cloud properties and thus affecting the Earth's radiative balance. The aerosol-radiation interaction depends on aerosol composition, amounts and temporal and spatial (vertical and horizontal) distributions. Volcanic eruptions are natural sources of aerosols (ashes and sulphate aerosols), which tend to cause a cooling effect at the surface due to solar radiation scattering back to space (Robock, 2000). This work aims to assess the local shortwave (SW) radiative effects, namely the SW radiative forcing and the corresponding radiative heating rates, of a volcanic plume event detected over the city of Évora (38.57°N, 7.91°W, 293 m asl) from 11-13 October 2021. This plume was transported from the Tajoigaite volcano (28.57°N, 17.83°W; volcanic edifice elevation of 1121 m asl), located in the Canary Islands, during its eruptive activity that lasted from September to December 2021 as illustrated in Figure 1. The SW radiative effects are used to quantify the impact of aerosols on SW radiation, through the difference between the SW net fluxes in an atmosphere with aerosols and an atmosphere without aerosols, and to evaluate the effects of a volcanic eruption on climate.

DATA AND METHODOLOGY

The aerosol properties, composition, amounts and distribution, are fundamental to assess the aerosol radiative effects. Sentinel-5P satellite observations revealed the presence of a plume of sulphur dioxide (SO₂) over the south of the Iberian Peninsula on 12th October as indicated in Figure 2(a). Also, the aerosol optical depth (AOD) at 500 nm, from the Aerosol Robotic Network (AERONET; Holben et al., 1998), for the different aerosol modes (fine, coarse and total) and the Angström Exponent (AE), for the wavelength pair 440/870 nm, in Figure 2(b) indicate that the fine mode particles dominated in the atmospheric column over the city of Évora during the whole event with maximum values on 12th October. In addition, ground-based lidar measurements revealed a layer of fine-mode particles located over the city of Évora between 2.5 to 5.0 km above sea level, as shown in Figure 3(b). In this figure (3(b)), the particle depolarization ratio (low and relatively constant values) suggests the predominance of small particles during the entire event. These data and the satellite observations of SO₂ hint that the plume is constituted by sulphate particles as discussed in Salgueiro et al. (2023). In addition, Salgueiro et al. (2023) demonstrated that the volcanic ash plumes remained near the Canary Islands.

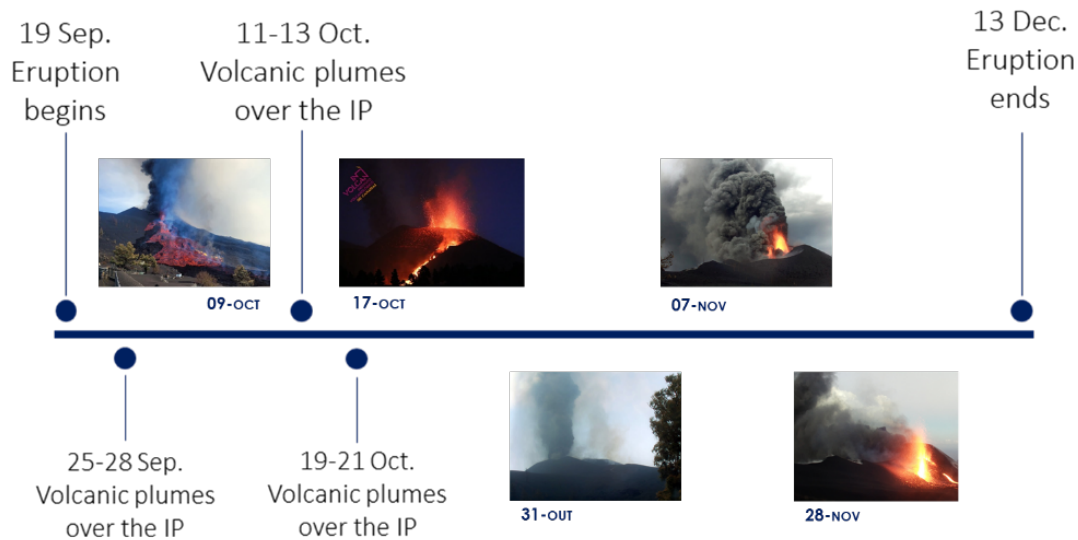


Figure 11: Timeline of the Tajogaite volcano eruptive activity in 2021. Volcano pictures from: <https://volcano.si.edu/volcano.cfm?vn=383010> (accessed on 10/11/2022).

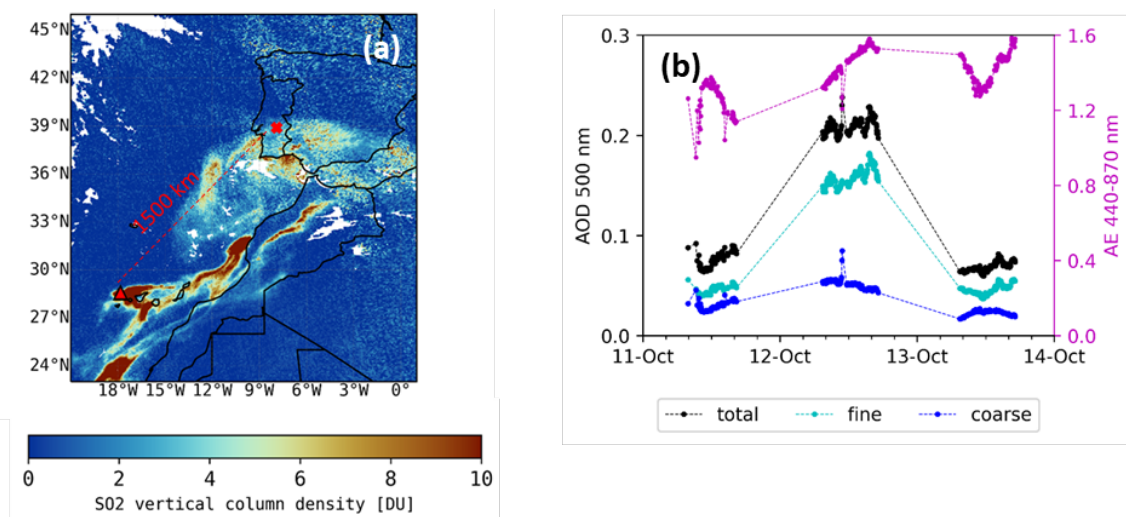


Figure 12: (a) SO₂ plumes from Sentinel-5P satellite on 12/10/2021 and (b) AERONET aerosol optical depth (AOD) and Angström Exponent (AE) in the atmospheric column over the city of Évora from 11-14 October.

The SW aerosol radiative effects, namely the SW aerosol radiative forcing (ARF_{SW}) and the corresponding SW heating rates, are computed using the *uvspec* program in the LibRadtran software package (Mayer and Killing, 2005; Emde et al., 2016) and the measured aerosol properties as input parameters for the model. Aerosol properties, such as the vertical profiles of the extinction coefficient (Figure 3(a)), are obtained from the GRASP algorithm (Román et al., 2021) that combines measurements of lidar and sun-photometer remote sensing instrumentation. The aerosol optical and microphysical properties from GRASP retrievals were already discussed and reported in Salgueiro et al. (2023). From the GRASP algorithm, the extinction profiles at lidar and sun-photometer wavelengths (355, 440, 532, 675, 870, 1020 and 1064 nm) for the cases indicated by the vertical coloured lines in Figure 3(b) are used. In Figure 3(a), the extinction profiles at 532 nm are given as examples. The extinction profiles at different wavelengths (e.g., Figure (4)) are used as input parameters by the *uvspec* program in the radiative transfer calculations of the SW fluxes. Other parameters that characterize the aerosols as the single scattering albedo (*ssa*), asymmetry parameter and moments of the phase function are needed for the calculations. The *ssa* at the same wavelengths as the extinction coefficient is obtained from GRASP retrievals and the approximation by Abreu et al. (2020) is assumed in the band extremes. The asymmetry parameter (first-order moment of the phase function) was obtained from AERONET daily mean values at 440, 675, 870 and 1020 nm and interpolated for the remaining wavelengths. The asymmetry parameter is used to calculate the 20-first Legendre moments of the Henyey-Greenstein phase function (Molero et al., 2021). Other input parameters that characterize the atmosphere and the surface needed to run the model such as the water vapour and ozone were obtained from ERA-5 reanalysis (Hersbach et al., 2023);

surface albedo was obtained from AERONET (daily mean values) at 440, 675, 870 and 1020 nm and interpolated for the remaining wavelengths. In the band extremes, the methodology by Molero et al. (2021) was followed. The radiative transfer equation is solved in the SW (300 – 4000 nm) spectral range using the DISORT solver (Stamnes et al., 1998) with 16 streams for a mid-latitude winter profile (Anderson et al, 1986) and a k-distribution absorption band parameterization lowtran (Ricchiazzi et al., 1998). The profiles of SW fluxes and heating rates are calculated for the atmosphere with volcanic aerosols and for a clean atmosphere (without aerosols).

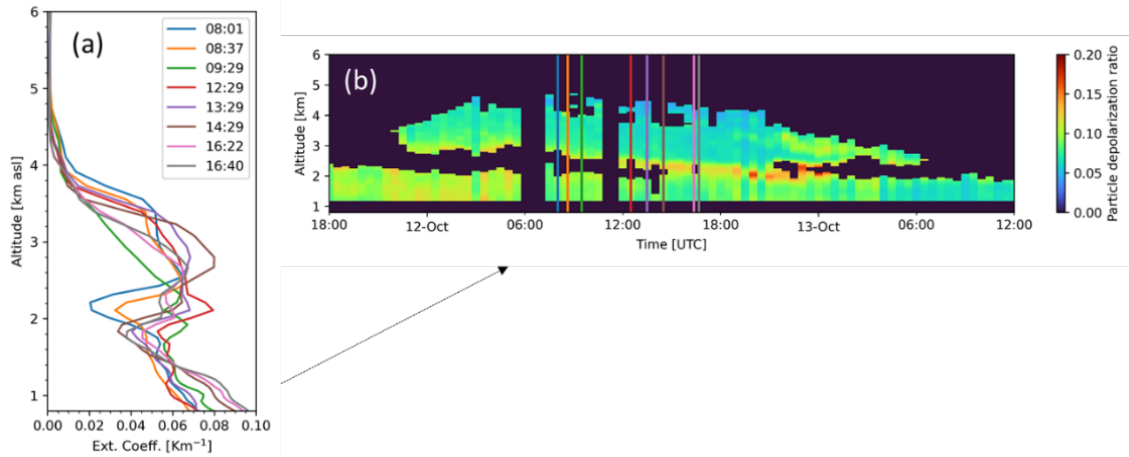


Figure 13: (a) Vertical profiles of the extinction coefficient at 532 nm, at different hours, on 12th October and (b) particle depolarization ratio from Lidar. The particle depolarization ratio (b) is adapted from Salgueiro et al. (2023).

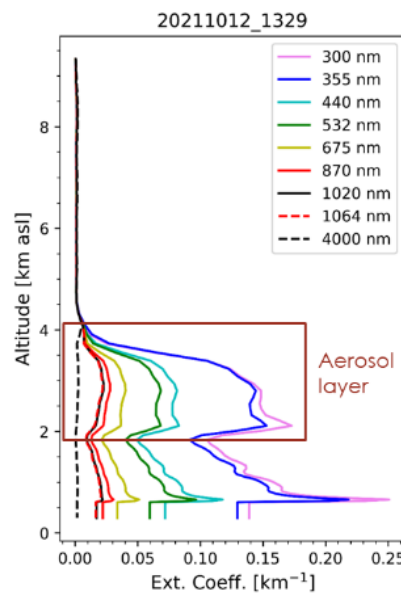


Figure 14: Vertical profiles of the extinction coefficient at several wavelengths used as inputs for Libradtran.

RESULTS

Figure 5(a) shows the vertical profiles of SW aerosol radiative forcing (ARF_{SW}) as a function of the solar zenith angle. As expected, ARF_{SW} presents negative values along the profile being more negative for higher solar zenith angles because of the larger atmospheric path crossed by radiation. Figure 5(b), shows the mean vertical profile of the SW heating rates and the corresponding mean extinction coefficient of the eight profiles considered (Figure 3(a)). The effect of the aerosol vertical distribution is clearly shown in the heating rates profile that follows the behaviour of the aerosol extinction coefficient profile. The layer of aerosols produces a heating of the troposphere in SW with a maximum value of the mean heating rates of 0.43 ± 0.06 K.day⁻¹ where the aerosol extinction coefficient is maximum. This warming of the atmosphere, where the aerosol layer is located, can be attributed to the absorption of solar radiation in the near-infrared region that can be significant in the presence of volcanic aerosols (Robock,

2000).

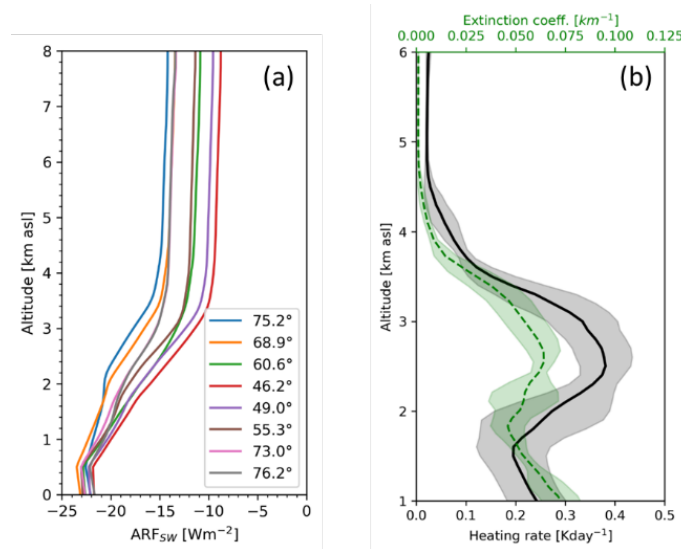


Figure 15: (a) Shortwave aerosol radiative forcing (ARF_{SW}) as a function of solar zenith angle and (b) Mean heating rate (black line) and mean extinction coefficient (traced green line) on 12th October; the shadow areas represent values in the mean ± 1 standard deviation range.

Figure 6 shows the temporal series of the ARF_{SW} (a) and the corresponding SW heating rates (b) at the surface and the top of the atmosphere (TOA) for the eight cases considered. It is important to note that these values of ARF_{SW} and heating rates are extrapolated by the radiative transfer model. Because of instrumentation characteristics and limitations, there is no information on aerosol extinction coefficient profiles below 800 m down to the surface and above 15 km to TOA. As expected, ARF_{SW} is negative at both levels with more negative values at the surface because less radiation arrives at the surface due to the backscatter. The SW heating rates present different signals at the surface and TOA levels. At the surface, heating rates vary between $-0.08 K.day^{-1}$ to $-0.02 K.day^{-1}$ at higher and low solar angles respectively translating a cooling effect due to the radiation backscattering by the plume. In opposition, the plume produces heating at TOA level varying between 0 and $0.02 K.day^{-1}$.

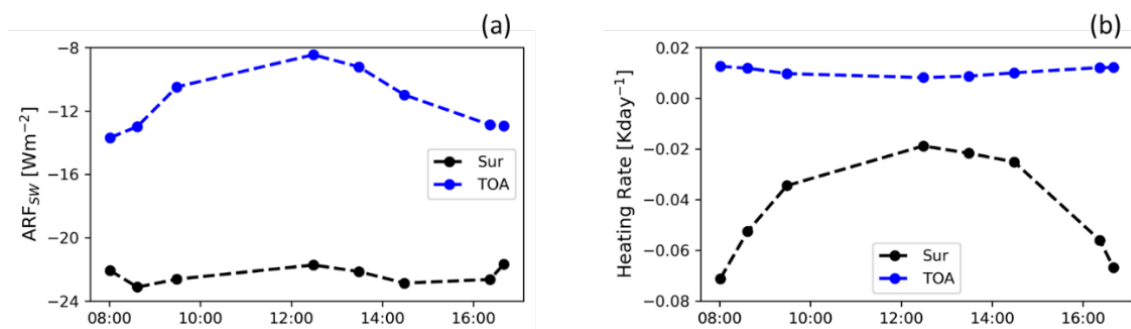


Figure 16: Temporal series of (a) SW aerosol radiative forcing (ARF_{SW}) and (b) heating rates on 12th October. Black lines represent the values at the surface and blue lines at the top of the atmosphere.

CONCLUSIONS

The local SW radiative effects produced by a plume of volcanic aerosols detected over Évora (11-13 October 2021) were assessed using radiative transfer calculations with LibRadtran model using as inputs vertical profiles of optical aerosol properties obtained from the synergy between lidar and sun-photometer remote sensing measurements. The plume, located between 2.5 and 5.0 km asl, was characterized by fine-mode particles during all the events (particle depolarization ratio mean values in the order of 0.08 ± 0.02 on 12 October and Angström Exponents above 1.2). The results showed a negative SW aerosol radiative forcing vertical profile and a positive signal of the SW heating rates translating into a warming effect of the troposphere where the plume was located. A warming effect was also observed at the TOA level while at the surface a cooling effect was observed.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work is funded by national funds through FCT - Fundação para a Ciência e Tecnologia, I.P., in the framework of the UID/06107/2023 -Centro de Investigação em Ciência e Tecnologia para o Sistema Terra e Energia.

REFERENCES

- [1] Robock, A. (2000): "Volcanic Eruptions on Climate". *Reviews of Geophysics*, 38, 191-219.
- [2] Salgueiro, V., J.L. Guerrero-Rascado, M.J. Costa, et al. (2023): "Characterization of Tajogaite volcanic plumes detected over the Iberian Peninsula from a set of satellite and ground-based remote sensing instrumentation". *Remote Sensing of Environment*, 295, 113684, 1-18.
- [3] Mayer, B. and A. Killing. (2005): " Technical Note: The LibRadtran Software Package for Radiative Transfer Calculations - Description and Examples of Use ". *Atmospheric Chemistry and Physics*, 5, 1855-77.
- [4] Emde, C., R. Buras-Schnell, A. Killing, et al. (2016): " The LibRadtran Software Package for Radiative Transfer Calculations (Version 2.0.1)". *Geoscientific Model Development*, 9, 1647-72.
- [5] Román, R., R. González, A. Cazorla, et al. (2021): "CAECENET: columnar and vertically-resolved aerosol products in near-real-time joining Sun/Sky photometer and ceilometer measurement networks". In: *European Lidar Conference*. Granada.
- [6] Abreu, E., P. Canhoto and M.J. Costa (2020): " Development of a Clear-Sky Model to Determine Circumsolar Irradiance Using Widely Available Solar Radiation Data". *Solar Energy*, 205, 88-101.
- [7] Holben, B.N., D. Tanré, A. Smirnov, et al. (1998): "AERONET - a federated instrument network and data archive for aerosol characterization". *Remote Sensing Environment*, 66, 1-16.
- [8] Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., et al. (2023): "ERA5 hourly data on pressure levels from 1940 to present". Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). <https://doi.org/10.24381/cds.bd0915c6> (last access: 25 July 2023).
- [8] Molero, F., A. J. Fernández, M. A. Revuelta, et al. (2021): " Effect of Vertical Profile of Aerosols on the Local Shortwave Radiative Forcing Estimation ". *Atmosphere*, 12, 1-19.
- [9] Stamnes, K., Tsay, S.-C., Wiscombe, W., and Laszlo, I. (2000): "DISORT, a General-Purpose Fortran Program for Discrete-Ordinate-Method Radiative Transfer in Scattering and Emitting Layered Media: Documentation of Methodology". Tech. rep., Dept. of Physics and Engineering Physics, Stevens Institute of Technology, Hoboken, NJ 07030.
- [10] Anderson, G., Clough, S., Kneizys, F., et al. (1986): "AFGL atmospheric constituent profiles (0-120 km)". Tech. Rep. AFGL-TR-86-0110, Air Force Geophys. Lab., Hanscom Air Force Base, Bedford, Mass.
- [11] Ricchiazzi, P., Yang, S., Gautier, C., and Sowle, D. (1998): "SBDART: "A research and Teaching software tool for plane-parallel radiative transfer in the Earth's atmosphere". *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79, 2101-2114.

Modelação da piro-convecção durante mega incêndios em Portugal

Modelling pyro-convection during megafires in Portugal

COUTO, Flavio T. ^(1,2); CAMPOS, Cátia ⁽¹⁾; FILIPPI, Jean-Baptiste⁽³⁾; BAGGIO, Roberta ⁽³⁾; PURIFICAÇÃO, Carolina ⁽¹⁾; SANTOS, Filipe L. M. ⁽²⁾; SALGADO, Rui ^(1,2)

⁽¹⁾ Centro de Investigação em Ciência e Tecnologia para o Sistema Terra e Energia – CREATE, Instituto de Investigação e Formação Avançada-IIFA, Earth Remote Sensing Laboratory (EaRS Lab), Universidade de Évora, Évora, Portugal.

⁽²⁾ Departamento de Física, Escola de Ciências e Tecnologia, Universidade de Évora, Évora, Portugal.

⁽³⁾ Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), Sciences Pour l'Environnement – Unité Mixte de Recherche 6134, Université di Corsica, Corte, France.

Autor correspondente: fcouto@uevora.pt

ABSTRACT

In 2017, Portugal was affected by several wildfires that exhibited extreme behaviour. To investigate the pyro-convective activity in two megafires that occurred in 2017, two numerical simulations were carried out with the Meso-NH atmospheric model coupled to the FireFire fire propagation model. The experiments were configured for three nested domains of horizontal resolution of 2000 m, 400 m, and 80 m. The vertical grid is composed of 50 height-based terrain-following levels. Heat and water vapour fluxes were emitted into the atmosphere and carried out by FireFire, which allows the fire front temporal evolution calculation, considering the terrain slope, atmospheric properties, and fuel characteristics. The simulations were performed in a one-way coupling, i.e., the fire front evolution is directly imposed from a pre-defined map obtained from official reports. The simulations showed that coupling the atmospheric model with the fire propagation model allows exploring the fire impacts on the atmosphere, namely the clouds formation inside the smoke plume. In the Quiaios megafire, the simulation indicated the formation of a pyroCu cloud, while for Pedrógão Grande it was possible to verify that the pyro-convective column produced a pyroCb cloud.

PALAVRAS-CHAVE

Meteorologia dos fogos, Modelação de incêndios florestais, Piro-convecção, Piro-Cumulonimbus.

INTRODUÇÃO

Em 2017, Portugal continental ficou marcado por uma temporada de incêndios extremos, que resultaram na morte de mais de 100 pessoas. O primeiro evento mortal ocorreu em junho na região de Pedrógão Grande e causou mais de 60 vítimas mortais [e.g., 1, 2]. Em meados de outubro, um conjunto de incêndios florestais extremos devastaram a região Centro de Portugal continental, resultando em 48 vítimas mortais [3]. De acordo com o relatório do IPMA [4], o dia 15 de outubro foi caracterizado por condições meteorológicas de incêndio extremas e por um baixo teor de humidade dos combustíveis, resultando em valores elevados dos índices meteorológicos. Por exemplo, o índice meteorológico de incêndio (Fire Weather Index, FWI) apresentou valores excecionalmente altos para outubro, com valores acima do percentil 50 durante a primeira quinzena e atingiu o valor mais elevado desde 1999 em 15 de outubro de 2017 (FWI = 59,2). Em relação ao Índice de propagação inicial (Initial Spread, ISI), o índice apresentou valor superior ao percentil 90 naquele dia [4].

Estes eventos mais extremos estão frequentemente associados a fortes processos convectivos devido ao calor e à humidade libertados pelos próprios incêndios. Esse ambiente de acoplamento entre fogo e atmosfera pode levar à formação de nuvens convectivas, também conhecidas como nuvens PyroCumulus (PyroCu) ou PyroCumulonimbus (PyroCb). As primeiras são mais comuns e podem se formar como nuvens relativamente pequenas acima das plumas de fogo. Os PyroCb podem ser observados em incêndios florestais que são dominados por plumas, caracterizadas por terem colunas de convecção muito intensas, formando nuvens semelhantes às cumulonimbus (Cb). Os processos microfísicos, como a condensação de humidade na pluma de incêndio, podem aumentar a convecção, na medida que também libertam calor latente. Em determinadas situações, as correntes ascendentes conseguem mesmo penetrar as camadas mais baixas da estratosfera [5,6]. A atividade do PyroCb pode ter um impacto significativo no comportamento do fogo por meio de processos de feedback entre a atmosfera e o fogo, incluindo o rápido aumento da área ardida. Nestas situações, a rápida propagação das frentes do fogo é induzida pelas fortes variações na direção e velocidade do vento à superfície. As alterações no campo do vento à superfície podem ocorrer devido a movimentos convectivos criados no ambiente do fogo, a partir de correntes descendentes intensas [e.g., 7,8]. No caso dos incêndios de

outubro de 2017 e de acordo com um relatório oficial das autoridades portuguesas [3], a atividade piro-convectiva extrema associada ao desenvolvimento de nuvens PyroCb ocorreu em vários mega incêndios, nomeadamente em Pataias, Arganil, Lousã e Sertã.

Em geral, os modelos atmosféricos não levam em conta os efeitos dos incêndios. No entanto, os avanços computacionais permitem um aumento na resolução das simulações numéricas, bem como o desenvolvimento de modelos acoplados fogo-atmosfera, que ajudam a compreender e representar atempadamente o comportamento do fogo e contribuem assim para a proteção de civis e bombeiros. Especificamente, simular os efeitos acoplados entre fogo e atmosfera tem sido objeto de muitos esforços nos últimos anos [9,10,11]. Portanto, o objetivo do estudo é utilizar um modelo acoplado de fogo-atmosfera para investigar as principais características de atividade piro-convectiva em dois eventos, nomeadamente o impacto de um incêndio na atmosfera. O primeiro evento considerado foi o mega incêndio de Quiaios, de outubro de 2017, enquanto o segundo foi o evento de Pedrógão Grande ocorrido em junho de 2017.

METODOLOGIA

Para investigar a atividade piro-convectiva em dois mega incêndios ocorridos em 2017, foram realizadas duas simulações numéricas com o modelo atmosférico Meso-NH acoplado ao modelo de propagação de fogo ForeFire.

O Meso-NH é um modelo não-hidrostático capaz de representar os movimentos atmosféricos em diferentes escalas, implementado com um pacote de parametrização bastante completo dos processos físicos na atmosfera [12]. O ForeFire é um modelo de propagação de fogo [13,14] que permite o cálculo da evolução temporal da frente do fogo e a emissão de fluxos de energia e massa para a atmosfera. O modelo tem em conta a inclinação do terreno, propriedades atmosféricas (velocidade do vento, densidade do ar e temperatura do ar), a distribuição espacial e as características dos combustíveis, e assume que o fogo se propaga na direção normal à linha da frente.

Dentre os eventos de outubro e dada a evidência fotográfica da formação de uma nuvem PyroCu, o estudo de caso selecionado foi o evento do mega incêndio de Quiaios e num processo mais extremo de acoplamento fogo-atmosfera, foi considerado o incêndio de Pedrógão Grande em junho de 2017. Várias simulações foram efetuadas visando obter o cenário mais realista do evento. A Figura 1 mostra a configuração horizontal para o incêndio de Quiaios e a Figura 2 mostra a configuração horizontal para o incêndio de Pedrógão Grande. Em ambos os casos, a configuração é semelhante: o MesoNH foi acoplado ao modelo ForeFire e configurado em 3 domínios aninhados (300×300 pontos da grelha cada). A resolução da grelha horizontal é de 2000 m para o domínio mais externo cobrindo $600 \text{ km} \times 600 \text{ km}$. As grelhas internas têm resoluções de 400 m e 80 m, cobrindo uma área total de respetivamente $120 \text{ km} \times 120 \text{ km}$, $24 \text{ km} \times 24 \text{ km}$ (Figura 1a e Figura 2a). Em ambos os casos, o passo de tempo utilizado foi de 10 s para o domínio mais externo e diminuiu para 2 s e 0.5 s para os domínios internos. As condições iniciais e de fronteira para o domínio externo foram fornecidas pelas análises do Centro Europeu "European Centre for Medium-Range Weather Forecasts" (ECMWF), com atualizações a cada 6 h. A resolução vertical é idêntica para todos os domínios aninhados, com 50 níveis até 20 km e um primeiro nível a 30 m de altura acima do solo. Todos os modelos aninhados recorreram a um esquema de fecho da turbulência de ordem um e meio. Os domínios de resolução mais alta (D2 e D3) usaram a versão 3D do esquema, enquanto o primeiro domínio (D1) considerou apenas a versão 1D, negligenciando os fluxos turbulentos horizontais.

Em relação ao domínio do fogo, as Figuras 1b e 2b mostram a evolução da frente de fogo e consequente área ardida utilizada neste trabalho, a qual foi definida a partir dos mapas de propagação do fogo [1,15]. O modelo de fogo foi configurado numa resolução de 20 metros, com 1200×1200 pontos de grelhas.

EXPERIÊNCIA DE QUIAIOS

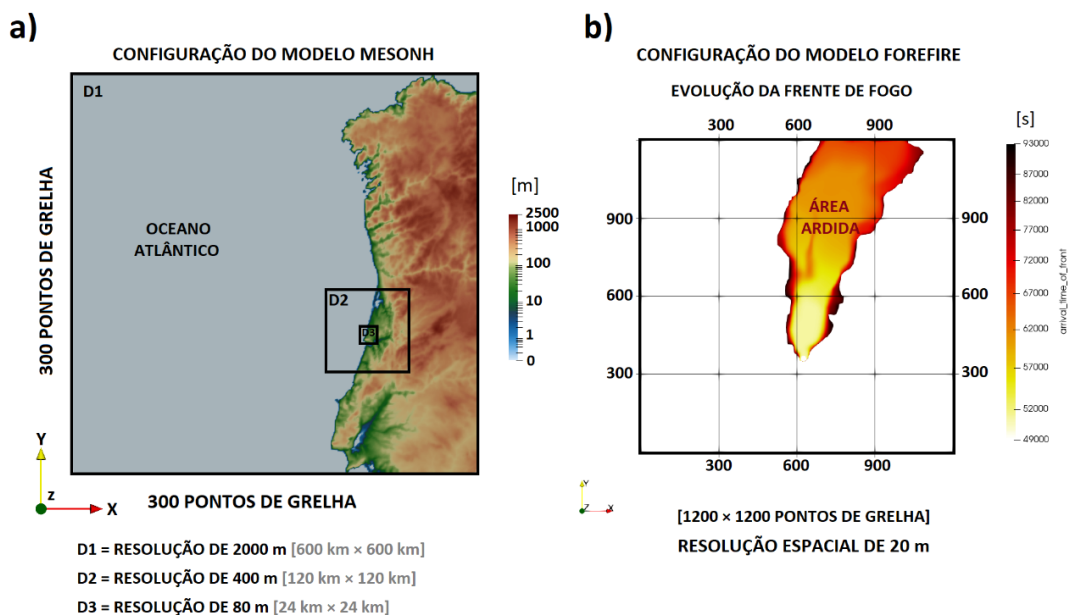


Figure 1: Configuração da experiência numérica de Quiaios: a) grelha horizontal do MesoNH e b) grelha do modelo de propagação de fogo ForeFire.

EXPERIÊNCIA DE "PEDRÓGÃO GRANDE" E "GÓIS"

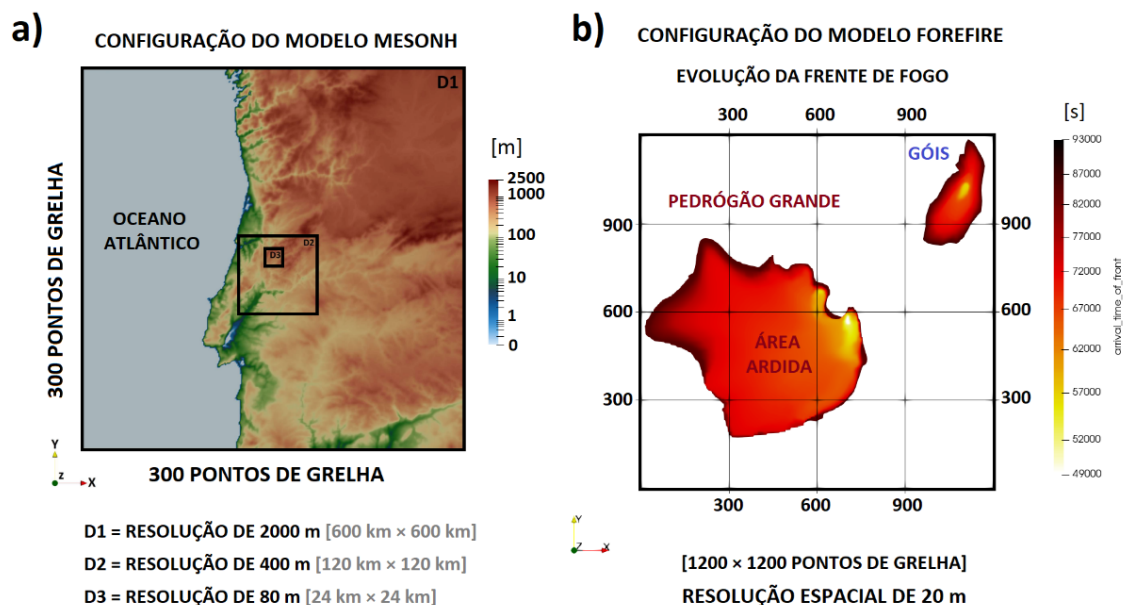


Figure 2: Configuração da experiência numérica de Pedrógão Grande e Góis a) grelha horizontal do MesoNH e b) grelha do modelo de propagação de fogo ForeFire com respetiva área ardida usada.

Considerando que as regiões de estudo estão cobertas por grandes áreas de floresta, o combustível foi considerado homogéneo, seguindo o modelo de combustível 11 de [16] com uma carga média de queima de combustível de 2,5 Kg/m² a 30% de humidade (0,75 Kg de água, 1,75 kg de combustível). Admite-se que entalpia de combustão é dada por $D_h = 1,5 \times 10^7$ J/kg e a evaporação $D_{hw} = 2,3 \times 10^6$ J/kg, o que resulta numa energia total libertada, após a secagem, de $2,4525 \times 10^7$ J/m². Assume-se que apenas 40% dessa energia vai ser transferida diretamente para a atmosfera, pois a combustão pode ser incompleta e grande parte da energia é transferida por radiação para o solo e para o espaço e para aquecer o combustível até à pirólise. Os 0,75 kg/m² de

vapor de água e os $10 \times 10^6 \text{ J/m}^2$ de energia são enviados para a atmosfera (introduzidos no primeiro nível do modelo atmosférico) sobre o local da frente de fogo assumindo uma duração de queima de 1000s, o que resulta em fluxos instantâneos de $0,75 \text{ g.m}^{-2}.\text{s}$ de vapor de água e 10 kW.m^{-2} . Uma descrição mais detalhada sobre o cálculo dos fluxos de calor no modelo FireFox pode ser encontrado em Filippi et al. [11,13]. A pluma de fumo é ilustrada utilizando a variável de concentração relativa do traçador de fumo (S), uma variável escalar unitária, emitida onde e quando o fogo está presente. Atualmente a variável S é simplesmente um traçador não interagindo com outros módulos do modelo, não sendo tido em conta nos processos da microfísica das nuvens nem na transferência radiativa. A descrição da variável S pode ser encontrada em Baggio et al. [17].

RESULTADOS

No primeiro caso de estudo, a simulação mostrou que os fluxos turbulentos e as correntes ascendentes organizadas permitiram o transporte vertical de vapor de água para níveis mais elevados (não mostrado). A Figura 3 mostra a variável S representando o fumo associado ao incêndio, enquanto no topo da pluma de fumo, o campo da razão de mistura de graupel, mesmo com valores muito baixos, indica a presença de hidrometeoros dentro da coluna convectiva, confirmando que o acoplamento entre o modelo de propagação do fogo e o modelo atmosférico representou atividade piro-convectiva, contribuindo para o desenvolvimento de piro-nuvens. A presença de hidrometeoros foi encontrada apenas no domínio de resolução de 400 m.

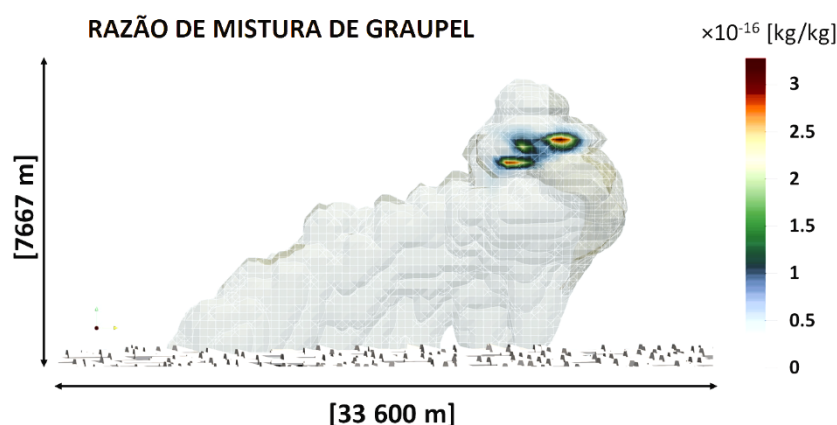


Figure 3: Secção vertical intersectando o incêndio de Quiaios da variável de concentração relativa do traçador de fumo (S) e razão de mistura de graupel. Resultados da simulação no domínio com 400 m de resolução espacial.

No caso de Pedrógão Grande, a Figura 4a mostra o campo de energia cinética turbulenta com maior intensidade perto da superfície (acima de $5 \text{ m}^2/\text{s}^2$), o que facilita a mistura vertical dos componentes dentro do ambiente de incêndio. Por outro lado, os movimentos turbulentos aumentam o transporte vertical de calor, permitindo-lhe atingir níveis mais elevados da atmosfera, assim como o transporte de fumo e de vapor de água. É de ressaltar também a região turbulenta próxima ao topo da pluma de fumo, com valores em torno de $2 \text{ m}^2/\text{s}^2$.

Portanto, a frente de fogo à superfície, bem como a forte interação fogo-atmosfera, com o fogo induzindo intensas correntes convectivas ascendentes, estiveram associadas a movimentos turbulentos por toda a troposfera (Figura 4a). Essas correntes ascendentes contribuíram para o transporte vertical de vapor de água para níveis superiores, como pode ser visto na Figura 4b. A simulação revela o grande impacto do incêndio de Pedrógão Grande na atmosfera através do desenvolvimento de uma nuvem convectiva verticalmente extensa.

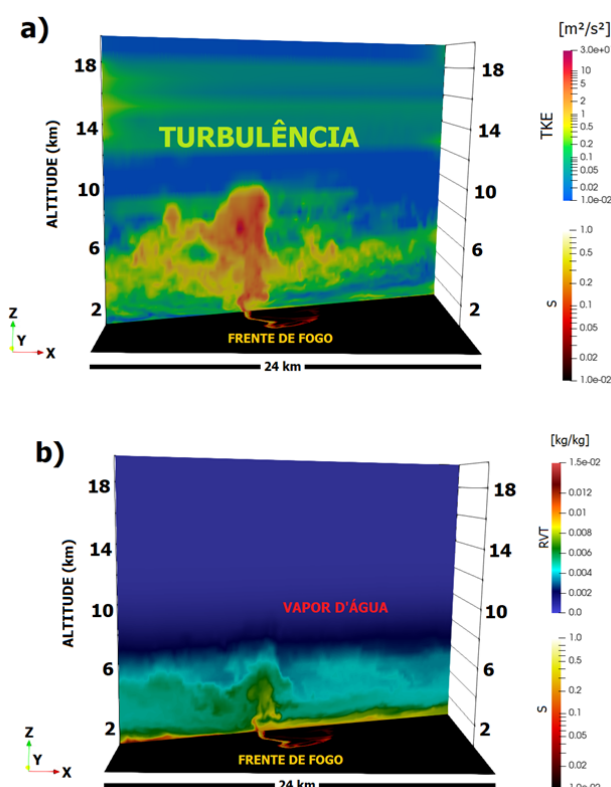


Figure 4: Secção vertical intersectando o incêndio de Pedrógão Grande, a) energia cinética turbulenta e b) razão de mistura do vapor de água. Resultados da simulação no domínio com 80 m de resolução espacial.

A Figura 5 mostra que a pluma está associada a uma nuvem de PyroCb, que resulta da condensação no interior da pluma de fumo. Tal nuvem é representada por cinco espécies de hidrometeoros (gotículas de nuvem, gotas de chuva, graupel, neve ou agregados, cristais de gelo). A convecção associada ao incêndio penetrou a troposfera superior acima de 10 km de altitude.

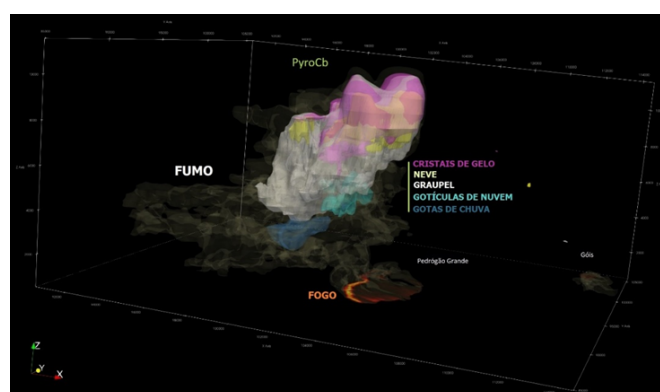


Figure 5: Anatomia da nuvem PyroCb desenvolvida sobre o incêndio de Pedrógão Grande indicando a presença de cinco espécies de hidrometeoros (gotículas de nuvem, gotas de chuva, graupel, neve ou agregados, cristais de gelo). Resultados da simulação no domínio com 80 m de resolução espacial.

CONCLUSÕES

A propagação do fogo associada à atividade piro-convectiva extrema é atualmente altamente imprevisível e difícil de combater. Neste estudo, as descobertas mostram os benefícios do uso de modelo de resolução de nuvens acoplados a modelo de propagação de fogo para avaliar o potencial de condições perigosas associadas à piro-convecção.

No caso de Quiaios, a simulação acoplada permitiu identificar a formação de uma nuvem PyroCu composta por diferentes

espécies de hidrometeoros, nomeadamente graupel. A piro-nuvem desenvolveu-se no interior da pluma devido ao transporte vertical de vapor de água para níveis mais elevados. No incêndio de Pedrógão Grande, a violenta convecção provocada pelo fogo manifestou-se na formação de uma nuvem PyroCumulonimbus. É importante notar que um dos objetivos foi o de produzir uma análise meteorológica de referência de alta resolução (10s, 80m) que ajude a compreender o comportamento da linha de fogo de referência, construído a partir do relatório oficial. Dessa forma o fogo foi forçado garantindo-se uma representação realista da sua evolução podendo analisar-se os seus efeitos na atmosfera. No entanto, com esta metodologia o impacto da atmosfera na evolução da frente de fogo não foi simulado. O estudo ajudou a compreender melhor o evento piro-convectivo, nomeadamente os processos atmosféricos em contexto de microescala. No geral, uma melhor compreensão desses eventos é importante para melhorar a compreensão da piro-convecção e do comportamento da atmosfera em eventos extremos de incêndio.

Portanto, as simulações mostraram que o acoplamento do modelo atmosférico com o modelo de propagação de fogo permite explorar os impactos do fogo na atmosfera, nomeadamente a formação de nuvens no interior da coluna de fumo. No mega incêndio de Quiaios, a experiência numérica indicou a formação de uma nuvem pyroCu, enquanto em Pedrógão Grande foi possível verificar que a coluna piro-convectiva produziu uma nuvem pyroCb. O estudo destaca a eficácia das simulações acopladas fogo-atmosfera na representação de fenómenos meteorológicos induzidos pelo fogo.

Agradecimentos

Este estudo foi financiado pela FCT-Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P. no âmbito do projeto PyroC.pt (Ref. PCIF/MPG/0175/2019), e UID/06107/2023 – Centro de Investigação em Ciência e Tecnologia para o Sistema Terra e Energia | CREATE. Filipe L.M. Santos foi financiado pela FCT através da bolsa de doutoramento (BD.11960.2022).

REFERÊNCIAS

- [1] Relatório CTI (2017) In Análise e Apuramento dos Factos Relativos aos Incêndios que Ocorreram em Pedrógão Grande, Castanheira de Pera, Ansião, Alvaiázere, Figueiró dos Vinhos, Arganil, Góis, Penela, Pampilhosa da Serra, Oleiros e Sertão, entre 17 e 24 de junho de 2017; Comissão Técnica Independente (CTI), Assembleia da República: Lisboa, Portugal, 2017; p. 296.
- [2] Couto, F.T., Iakunin, M., Salgado, R., Pinto, P., Viegas, T., & Pinty, J.-P. (2020) Lightning modelling for the research of forest fire ignition in Portugal. Atmos. Res. 242, 104993. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.104993>.
- [3] Guerreiro, J., Fonseca, C., Salgueiro, A., Fernandes, P., Lopez Iglésias, E., de Neufville, R., Mateus, F., Castellnou Ribau, M., Sande Silva, J., Moura, J.M., et al., 2018. Avaliação dos Incêndios Ocorridos Entre 14 e 16 de Outubro de 2017 em Portugal Continental. Relatório Final; CTI Report 2018; Comissão Técnica Independente (CTI), Assembleia da República: Lisboa, Portugal, p. 274.
- [4] Simões N., I., Pinto, P., Silva, Á., B., M., Barroso, C., Santos, M., J. Lopes, M., Moreira, N., & Correia, S., 2018. Os Incêndios Florestais de 14 a 16 de outubro de 2017 em Portugal Continental-Characterização meteorológica. In: IPMA. https://www.ipma.pt/resources/www/docs/publicacoes.site/Simoes_Pinto_2018_Relatorio_Incendios_Outubro2017_%20VF.pdf
- [5] Fromm, M.D., & Servranckx, R. (2003) Transport of forest fire smoke above the tropopause by supercell convection. Geophys. Res. Lett., 30, 1542, doi:10.1029/2002GL016820, 10. <https://doi.org/10.1029/2002GL016820>.
- [6] Fromm, M., Lindsey, D.T., Servranckx, R., Yue, G., Trickl, T., Sica, R., Doucet, P., & Godin-Beekmann, S. (2010) The Untold Story of Pyrocumulonimbus. Bulletin of the American Meteorological Society, 91(9), 1193-1210. <https://doi.org/10.1175/2010BAMS3004.1>.
- [7] Tory, K.J., Thurston, W., and Kepert, J.D. (2018) Thermodynamics of Pyrocumulus: A Conceptual Study. Mon. Wea. Rev., 146, 2579–2598, <https://doi.org/10.1175/MWR-D-17-0377.1>.
- [8] Dowdy, A.J., Ye, H., Pepler, A., et al., (2019) Future changes in extreme weather and pyroconvection risk factors for Australian wildfires. Sci Rep 9, 10073. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-46362-x>.
- [9] Mandel, J., Amram, S., Beezley, J. D., Kelman, G., Kochanski, A. K., Kondratenko V.Y., Lynn, B. H., Regev, B. & Vejmělka, M., (2014) Recent advances and applications of WRF–SFIRE. NHESS. 14. 2829-2845. <https://doi.org/10.5194/nhess-14-2829-2014>.

- [10] Coen, J. L., Schroeder, W., Conway, S., & Tarnay, L., (2020) Computational modeling of extreme wildland fire events: A synthesis of scientific understanding with applications to forecasting, land management, and firefighter safety. *J. Comput. Sci.* 45, 101152. <https://doi.org/10.1016/j.jocs.2020.101152>.
- [11] Filippi, J.-B., Bosseur, F., Mari, C., & Lac, C., (2018) Simulation of a Large Wildfire in a Coupled Fire-Atmosphere Model. *Atmosphere*. 9(6), 218. <https://doi.org/10.3390/atmos9060218>.
- [12] Lac, C., Chaboureaud, J.-P., Masson, V., Pinty, J.-P., Tulet, P., Escobar, J., Leriche, M., Barthe, C., Aouizerats, B., Augros, C., Aumond, P., Auguste, F., Bechtold, P., Berthet, S., Bielli, S., Bosseur, F., Caumont, O., Cohard, J.-M., Colin, J., & Couvreux, F., 2018. Overview of the Meso-NH model version 5.4 and its applications. *Geosci. Model Dev.* 11(5), 1929-1969. <https://doi.org/10.5194/gmd-11-1929-2018>.
- [13] Filippi, J.-B., Bosseur, F., Mari, C., Lac, C., Le Moigne, P., Cuenot, B., Veynante, D., Cariolle, D., & Balbi, J.-H., (2009) Coupled atmosphere–wildland fire modelling. *J. Adv. Model. Earth Syst.* 2. <https://doi.org/10.3894/JAMES.2009.1.11>.
- [14] Filippi, J.-B., Bosseur, F., Pialat, X., Santoni, P.-A., Strada, S., & Mari, C., 2011. Simulation of Coupled Fire/Atmosphere Interaction with the MesoNH-ForeFire Models. *J. Combust.*, 1-13. <https://doi.org/10.1155/2011/540390>.
- [15] Pinto, P.; Silva, Á.P.; Viegas, D.X.; Almeida, M.; Raposo, J.; Ribeiro, L.M. (2022) Influence of Convectively Driven Flows in the Course of a Large Fire in Portugal: The Case of Pedrógão Grande. *Atmosphere*, 13, 414. <https://doi.org/10.3390/atmos13030414>.
- [16] Anderson, Hal E., 1982. Aids to determining fuel models for estimating fire behavior. Gen. Tech. Rep. INT-122. Ogden, Utah: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. 22p.
- [17] Baggio, R.; Filippi, J. B.; Truchot, B. & Couto, F. T., (2022) Local to continental scale coupled fire-atmosphere simulation of large industrial fire plume. *Fire Saf. J.* 103699. <http://dx.doi.org/10.1016/j.firesaf.2022.103699>.

S.06

Oceanografia Física

Oceanografía Física

Influência da circulação induzida pela topografia na dispersão dos fragmentos de rocha gerados durante atividades de mineração em alto mar

Deep-Sea-mining rock-fragments transport driven by topographically induced circulation

AMORIM, Fabíola ⁽¹⁾; IGLESIAS, Isabel ⁽¹⁾; BIO, Ana ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Centro Interdisciplinar de Investigação Marinha e Ambiental (CIIMAR/CIMAR), Matosinhos, Portugal.

Autor correspondente: famorim@ciimar.up.pt

SUMMARY

In recent years there has been an increase in interest in deep sea mining to meet the industry demand for mineral resources. However, deep-sea resources, such as polymetallic crusts on seamounts, polymetallic nodules (PMN) on abyssal plains and polymetallic sulphides (PMS) on mid-ocean ridges, are generally found close to vulnerable ecosystems. Aware of the potential hazards associated with deep-sea mining, the International Seabed Authority (ISA) has been working on the consolidation of Regional Environmental Management Plans (REMP), aiming at a preventive regulation of activities in the deep ocean. A first REMP was adopted for the Clarion-Clipperton Zone (CCZ), a PMN rich abyssal region. However, this plan cannot be used as a standard for other mining regions, because mining techniques and bottom topography of an abyssal plain differ significantly from, for instance, those of seamounts and ridges systems. Indeed, the deep-sea bottom topography of seamounts and ridge-system regions can either constrain the circulation or enhance the free passage of water currents through valleys, and the eddies related to the abrupt topographic changes can broaden the impacted areas. In addition, the local bottom circulation can become an order of magnitude more energetic due to the passage of remotely generated mesoscale eddies. To investigate the dynamics and impacts of deep-sea mining in a PMS rich area of the Northern Mid-Atlantic Region, a high-resolution eddy-resolving ocean circulation model with embedded nesting capability was coupled to a Lagrangian model, comprising three different hydrothermal fields. Results showed that the local topography plays a major role in the dispersion, residence-time and settling of the rock fragments. In the presence of local submesoscale processes, the residence-time does not follow the neutral height/settling velocity (H/v_s) relationship, with residence times greater in flatter areas than in rugged-topography regions, even when the latter are deeper.

PALAVRAS-CHAVE

Circulação topográfica, Mineração em mar profundo, Modelação hidrodinâmica, Modelação Lagrangeana.

INTRODUÇÃO

A crescente procura de matérias-primas para abastecer as novas tecnologias despertou o interesse na mineração em mar profundo como uma fonte potencial e economicamente viável para a extração de minerais. Crostas polimetálicas (PMC) em montes submarinos, nódulos polimetálicos (PMN) nos planos abissais e os sulfuretos polimetálicos (PMS) nas cadeias meso-oceânicas podem fornecer matérias-primas como cobre, níquel, cobalto, ferro ou manganês para suprir a necessidade crescente da indústria [1]. No entanto, a maioria destes metais encontra-se em recursos minerais localizados perto de ecossistemas vulneráveis [2]. Mesmo estando cientes da importância dos ecossistemas de águas profundas e do seu potencial para as aplicações biotecnológicas, a Autoridade Internacional do Fundo Marinho (International Seabed Authority - ISA), aquando da publicação deste manuscrito, já atribuiu dezanove contratos para exploração de PMN, sete para exploração de PMS e cinco para exploração de crostas de ferromanganês ricas em cobalto.

Para proteger os ecossistemas de mar profundo, a ISA tem-se dedicado ao desenvolvimento de Planos Regionais de gestão Ambiental (REMP) [2], que visam uma gestão preventiva das atividades humanas nessas regiões e não se limitam às atividades de mineração. A primeira REMP foi criada para a zona abissal Clarion-Clipperton (CCZ)¹, rica em PMN. No entanto, para zonas hidrotermais e de montes submarinos, as características e técnicas de mineração podem diferir substancialmente daquelas

¹ <https://www.isa.org.jm/protection-of-the-marine-environment/regional-environmental-management-plans/ccz/>

adotadas em zonas abissais, exigindo uma avaliação com novas considerações baseadas em resultados científicos sólidos. Está a ser considerada a criação de uma REMP para a região da Cadeia Meso-Oceânica do Atlântico Norte (NMAR), uma vez que o conselho da ISA ainda está a delinear procedimentos normalizados para o desenvolvimento, revisão e aprovação de REMPs². A NMAR apresenta depósitos relevantes de PMS, encontrados próximos a campos hidrotermais ativos que abrigam ecossistemas únicos³. Existe consenso que o maior impacto da mineração de PMS em águas profundas está relacionado com a perda de substrato e a dispersão e sedimentação das plumas das atividades de mineração e das águas de retorno [3], sendo o tamanho dos fragmentos presentes nestas plumas dependente do método de mineração adotado [4]. Embora não haja consenso sobre qual tecnologia de mineração seria menos prejudicial, entre os métodos emergentes, o comumente proposto é o mecanismo de captação por sucção hidrodinâmica. Nesta metodologia, o veículo de recolha ressuspende os sedimentos do fundo e parte deles são descarregados no seu rasto, produzindo uma pluma de recolha [4]. A evolução da pluma de recolha ocorre em três regiões distintas, compreendendo diferentes fases: i) a fase inicial (campo próximo) é controlada pelas condições de descarga, caracterizadas pelo efeito dominante dos processos inerciais e turbulentos nas imediações dos equipamentos de mineração; ii) a segunda fase (zona de transição) é dominada pela flutuabilidade, onde o sedimento suspenso interage com o ambiente oceânico circundante; iii) a última fase (campo distante) é caracterizada pela advecção passiva da pluma por correntes locais, difusão turbulenta, correntes impulsionadas pela topografia do fundo oceânico e sedimentação e deposição dos sedimentos. Por definição, na última fase as correntes impulsionadas pela flutuabilidade já não desempenham um papel dominante no transporte dos sedimentos, uma vez que apresentam baixa concentração de sedimentos [4-6].

A extensão da região do campo distante é particularmente relevante para a quantificação do impacto ambiental das plumas de sedimentos da mineração em águas profundas, uma vez que pode prejudicar uma vasta gama de organismos bentónicos e pelágicos. Em particular, as correntes e topografia de fundo podem influenciar significativamente a extensão dos impactos das plumas de mineração [7]. A topografia acidentada das regiões hidrotermais pode alterar a extensão da pluma e o tempo de residência dos fragmentos de rocha na coluna de água, dependendo das características de submesoescala e mesoescala relacionadas com restrições topográficas ou com a passagem livre de correntes através de regiões mais planas. Além disso, estudos prévios demonstraram que a circulação em regiões profundas (>4 km de profundidade) pode ser uma ordem de grandeza mais energética em resposta à passagem de vórtices de mesoescala, podendo as plumas de mineração ter uma dispersão mais ampla e mais rápida [8].

A ausência de informação in situ sobre a dispersão de fragmentos de rocha das atividades de mineração, somada a limitação de alguns trabalhos [9-11], reforçam a necessidade de estudos dedicados para uma caracterização abrangente das especificidades de cada região hidrotermal. Neste contexto, modelos numéricos acoplados hidrodinâmico-Lagrangeano constituem ferramentas essenciais para a obtenção de uma representação fiável da dinâmica oceânica numa vasta gama de escalas temporais e espaciais. Os modelos hidrodinâmicos têm sido utilizados para simular a circulação em águas profundas em regiões com mudanças abruptas de topografia, como canhões, cordilheiras e montes submarinos [10,12-14]. Estes modelos podem reproduzir as perturbações no campo de densidade local induzidas pela morfologia destas regiões, que contribuem para a formação de vórtices, divergência/ressurgência induzida topograficamente e restrições de circulação. O acoplamento de modelos Lagrangeano e hidrodinâmico pode representar os impactos da circulação em alto mar na dispersão e recrutamento de plâncton, crustáceos, peixes e larvas [15,16], o comportamento de derrames de óleo [17,18], a dispersão de sedimentos [10,11,19] e de outro tipo de partículas passivas. No entanto, é preciso ter em conta que a previsão da circulação oceânica depende da resolução espacial e temporal do modelo adotado. Por exemplo, resoluções grosseiras tendem a subestimar a intensidade e tamanho de meandros e vórtices que podem promover a retenção das partículas, e dessa forma superestimar a dispersão de sedimentos [20].

O objetivo do presente estudo é entender como as variações sazonais da circulação de submesoescala e mesoescala nas regiões hidrotermais dos Açores podem influenciar a circulação de campo distante e a deposição de fragmentos de rocha das atividades de mineração em mar profundo. Para isso foi considerado i) um modelo hidrodinâmico realista de alta resolução com capacidade de aninhamento; ii) uma resolução temporal e espacial adequada para reproduzir processos e perturbações no campo de densidade de submesoescala e mesoescala relacionadas com restrições topográficas; iii) alterações sazonais das forçantes oceânicas e meteorológicas; iv) cenários de dispersão junto ao fundo para representar a dispersão de fragmentos de rocha provenientes do veículo de recolha; e v) cálculo da velocidade de deposição das partículas ajustado às características do

² <https://www.isa.org.jm/protection-of-the-marine-environment/regional-environmental-management-plans/northern-mar/>

³ <https://vents-data.interridge.org/>

fragmento de rocha.

CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está localizada numa seção particular do NMAR, na região dos Açores, onde existem dez campos hidrotermais conhecidos e ativos [21]. Como caso de estudo foram selecionados os campos hidrotermais ativos Lucky Strike (LS, localizado a 1740 m de profundidade), Menez Gwen (MG, a 850 m de profundidade) e Rainbow (RB, a 2320 m de profundidade), por existir uma vasta literatura a respeito das suas características ambientais e topográficas⁴ (Figura 1). Estes campos hidrotermais são considerados Áreas Marinhas Protegidas (AMP)⁵, localizadas dentro (MG e LS) e fora (RB) da Zona Económica Exclusiva (ZEE) portuguesa.

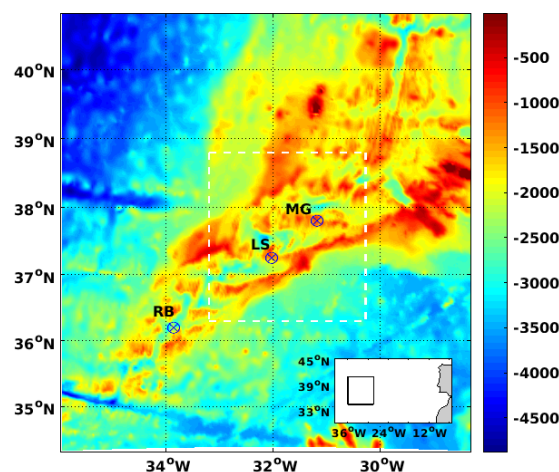


Figura 1: Domínios do modelo numérico. O bordo da figura corresponde com o domínio pai. O retângulo interior representa o domínio filho. Os símbolos representam a localização dos campos hidrotermais. O quadro inferior apresenta a localização do domínio pai em relação a Portugal Continental.

Observações realizadas na região NMAR encontraram maciços peridotíticos [22], níveis elevados de CH_4 nos fluidos hidrotermais do LS e do MG, relacionados com a serpentinização do manto e peridotitos [23], e presença de peridotitos, serpentinitos e esteatitos na fonte hidrotermal RB [24]. Devido à sua composição mineral e interesse comercial, os peridotitos (com densidade entre $3,100$ e $3,400 \text{ kg m}^{-3}$), os serpentinitos ($2,700$ – $3,300 \text{ kg m}^{-3}$) e os esteatitos ($2,600$ – $2,800 \text{ kg m}^{-3}$) são as rochas com maior potencial para a exploração na região de estudo. A exploração causaria libertação de fragmentos de rocha, cuja dimensão depende da tecnologia de corte utilizada e da ressuspensão dos sedimentos naturais devido aos procedimentos de mineração adotados. Os tamanhos naturais das partículas dos minerais nos minérios dependem dos processos de formação e podem variar de $10 \text{ }\mu\text{m}$ a $600 \text{ }\mu\text{m}$ [25].

METODOLOGIA

Como o principal objetivo do presente estudo é representar o efeito da circulação de submesoescala a mesoescala na dispersão de fragmentos de rocha gerados durante atividades de mineração em alto mar, numa região hidrodinâmica onde a flutuabilidade já não ocorre (campo distante), as ferramentas de modelação selecionadas descreverão o comportamento das plumas de fragmentos rochosos de maiores dimensões, incluindo as suas características físicas (tamanho, densidade, concentração, rugosidade). Para representar cenários de dispersão mais amplos, foram escolhidas libertações individuais de fragmentos de esteatitos de $100 \text{ }\mu\text{m}$, considerando o limite inferior das gamas de densidade deste mineral (2.6 g cm^{-3}). Este tamanho de fragmento de rocha está dentro dos limites das partículas adotadas em trabalhos semelhantes [9-11].

Para a representação da dispersão dos fragmentos de rocha foi adotado o modelo semi-Lagrangeano Ichthyop⁶. Esse modelo

⁴ <https://vents-data.interridge.org>

⁵ <https://www.dgrm.mm.gov.pt/en/web/guest/amp>

⁶ <http://www.ichthyop.org/>

representa a advecção e dispersão de fragmentos discretos de diferentes densidades e tamanhos utilizando campos oceanográficos produzidos por diversos modelos numéricos oceânicos [26], sendo bem-sucedido na simulação da dispersão de partículas passivas e não passivas em zonas de mar profundo com topografia complexa.

A velocidade 3D das partículas individuais é considerada uma função da velocidade do fluido 3D calculada pelo modelo hidrodinâmico, de uma velocidade aleatória e da velocidade de sedimentação, que é calculada em função da densidade e do diâmetro das partículas do sedimento. Uma vez que o tamanho dos fragmentos de rocha que podem ser gerados em atividades de mineração na região NMAR pode variar desde grãos finos a partículas grosseiras com formatos variados, foi adotada a formulação de Ferguson-Church [34] para o cálculo da velocidade de sedimentação. Essa formulação considera combinações de parâmetros dependentes das características geométricas das partículas, permitindo adotar uma relação intermédia para grãos de formato variado.

O modelo hidrodinâmico selecionado foi o Regional Ocean modelling System (ROMS) [28], configurado para a região NMAR com aninhamento bidirecional entre um domínio pai (resolução horizontal de 3 km) e um domínio filho (resolução horizontal de 1 km). Ambas as grelhas consideraram 30 níveis verticais definidos com coordenadas sigma. A grelha pai foi aninhada offline no produto Global de Reanálise (GLORYS), do Copernicus Marine Environment Service (CMEMS), que forneceu as condições de contorno iniciais e diárias (temperatura, salinidade, elevação e velocidades). As forçantes de maré barotrópicas derivadas de conjuntos de dados TPXO [29] foram também consideradas nos limites abertos da grelha pai. Este produto fornece os componentes de maré diurnos, semi-diurnos e de longo período. O domínio filho foi aninhado online no domínio pai, que fornece a temperatura, salinidade, elevação e velocidade na camada de contacto em cada intervalo de tempo. Os fluxos de vento e de superfície (humidade, pressão, temperatura, precipitação e radiação), derivados do Produto de Reanálise Climática e Meteorológica Global ERA5 [30], foram calculados internamente para ambas as grades utilizando a formulação Bulk. Os dados de batimetria selecionados para ambas as grades foram obtidos através do European Marine Observation and Data Network (EMODNET), com uma resolução de aproximadamente 200 m. As simulações foram realizadas para 2014, considerando um spin-up de um mês em dezembro de 2013. O ano de 2014 foi escolhido para permitir a validação das soluções do modelo com perfis de temperatura e salinidade amostrados na região NMAR durante o mês de julho de 2014, sobre a fonte hidrotermal LS, no âmbito do projeto Monitorização da Dorsal Médio-Atlântica (MoMar; www.interridge.org). Essa fonte de dados, em conjunto com resultados da distribuição espaço-temporal de TS provenientes de bóias ARGO e do produto Coriolis-CORA, foi considerada em função da ausência de dados de direção e intensidade das correntes próximo ao fundo submarino. A validação do modelo hidrodinâmico apresentou alta correlação em termos da dinâmica termohalina capturada pelos dados amostrados e pelos produtos ARGO e Coriolis-CORA [31].

Os cenários do modelo Lagrangeano cobriram as estações boreais de verão e de inverno, para ter em conta as mudanças sazonais das forçantes meteoceanográficas. A passagem de vórtices de mesoscala pode tornar uma ordem de grandeza mais energética a circulação em regiões com profundidade superior a 4 km [32]. Para cada cenário, foram libertados instantaneamente 5000 fragmentos de rocha discretos sobre cada fonte hidrotermal (MG, LS e RB), a 1 m do fundo do mar, para simular a dispersão produzida pelo veículo de recolha. Os resultados da simulação horária do Ichthyop foram utilizados para calcular a distância máxima percorrida por cada fragmento de rocha libertado e o respetivo tempo de dispersão.

RESULTADOS

A dispersão dos fragmentos é apresentada em termos de proporção de fragmentos de rocha depositados ao longo da distância percorrida desde o local de libertação (local de mineração) e do respetivo tempo de percurso. Foi considerado que os fragmentos foram depositados quando tocaram pela primeira vez o fundo. Os fragmentos libertados junto ao fundo apresentaram uma tendência de deposição junto aos campos hidrotermais, com mais de 90% dos fragmentos depositados em poucas horas e sendo transportados até a 10 km da fonte (Figura 2). Os padrões de dispersão apresentaram uma forte relação com a topografia e circulação locais.

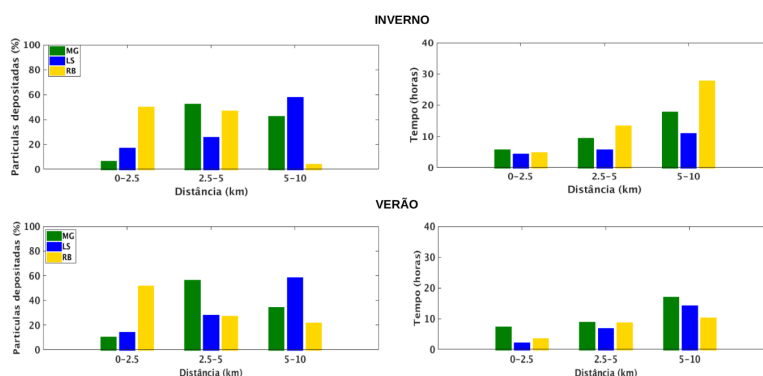


Figura 2: Percentagem (%) de fragmentos de rocha depositados ao longo da distância de dispersão (km) e seus respectivos tempos de dispersão. As barras verde, azul e amarela representam fragmentos liberados ao redor das fontes hidrotermais MG, LS e RB, respetivamente.

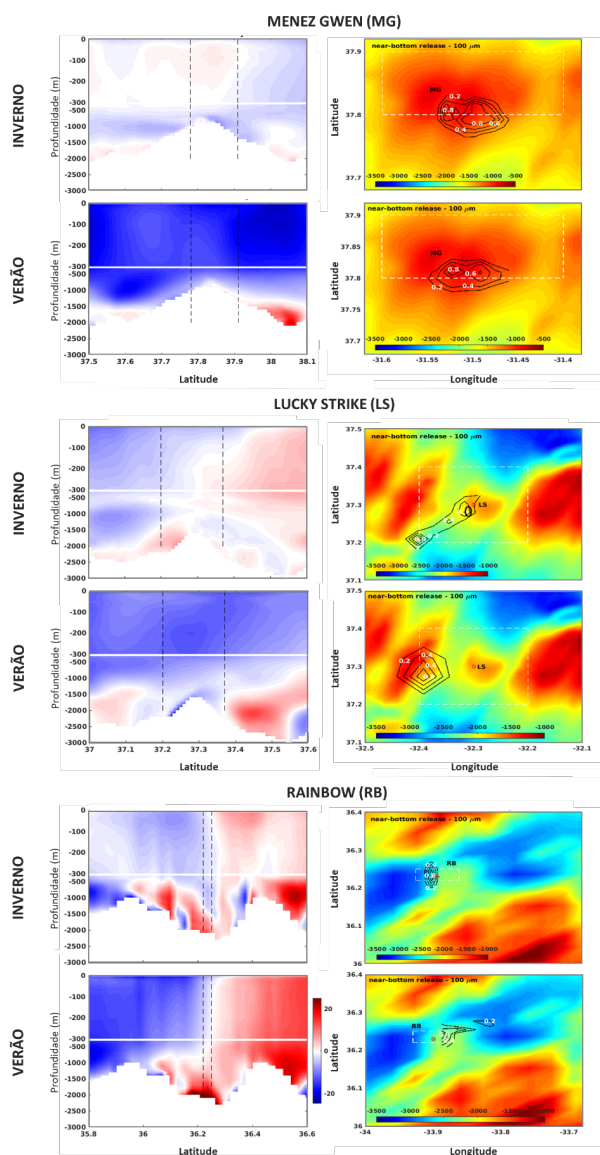


Figura 3: Coluna da esquerda: velocidade zonal média para a região das fontes hidrotermais, onde azul (vermelho) representa velocidades negativas (positivas) e para Oeste (Leste). Coluna da direita: áreas finais de deposição dos fragmentos de rocha no fundo oceânico em volta das fontes hidrotermais. As isolinhas representam a proporção (entre 0 e 1) de fragmentos depositados sobre a área (com intervalos de 0,2). As linhas verticais e os retângulos tracejados brancos delimitam as AMPs.

No campo hidrotermal de MG, e para ambas as estações do ano consideradas, 60% dos fragmentos de rocha libertados assentaram no fundo nos primeiros 5 km de distância e durante as primeiras 10 h (Figura 2). O 40% restante alcançaram distâncias de até 10 km, mantendo-se na coluna de água até 20 h. Esse comportamento está relacionado com a circulação na região do MG, que apresentou uma fraca componente zonal para oeste (negativa), em ambas as estações, mantendo os fragmentos de rocha próximos do local de lançamento, com parte deles a depositar-se fora da AMP (Figura 3).

No LS, os fragmentos de rocha apresentaram uma tendência para percorrer maiores distâncias e para permanecerem mais tempo na coluna de água. Neste local cerca de 60% dos fragmentos de rocha foram depositados até 10 km da fonte, ficando suspensos por até 12 h (Figura 2). A circulação em volta do LS exibiu um padrão ciclónico durante o inverno e um fluxo robusto e estável para oeste durante o verão. Esse comportamento da circulação restringiu os fragmentos rochosos no interior da AMP durante o inverno, com uma fraca propagação para oeste. Durante o verão, o fluxo mais estável empurrou os fragmentos rochosos para oeste, e parte dos fragmentos assentaram fora dos limites da AMP (Figura 3).

Cerca de 90% dos fragmentos de rocha libertados no campo hidrotermal de RB durante o inverno, assentaram em distâncias não superiores a 5 km da fonte, o que aconteceu dentro de poucas horas após o seu lançamento (Figura 2). Durante o verão, cerca de 20% dos fragmentos libertados em RB foram depositados a 10 km da fonte e demoraram até 10 h. A circulação nessa região apresentou uma circulação ciclónica robusta durante o inverno, o que restringiu a dispersão dos fragmentos de rocha, mantendo-os perto do local de lançamento. Durante o verão, foi observado um fluxo forte e estável para leste, o que dispersou a maior parte dos fragmentos de rocha para fora dos limites da AMP (Figura 3).

SÍNTESE E CONCLUSÃO

Considerando o conhecimento limitado sobre as condições *in-situ* do mar profundo e a sua variabilidade intra e interanual, o desenvolvimento de ferramentas numéricas para descrever a dinâmica oceânica é fundamental para dar suporte a uma exploração segura e sustentável do mar profundo. A caracterização das condições através de modelos hidrodinâmico e Lagrangeano acoplados pode ajudar no estabelecimento de diretrizes para definir padrões de mineração em alto mar, afim de mitigar os potenciais impactos associados a essa atividade. As previsões dos modelos podem fornecer informações importantes, ajudando a evitar impactos extensos, falhas de equipamentos e perda de vidas durante condições climáticas e oceânicas extremas. Além disso, as previsões podem ser usados para mapear regiões de sensibilidade ambiental e estabelecer áreas de mineração seguras, fornecendo informações importantes às entidades reguladoras, de forma a padronizar e regular a execução de atividades de mineração em alto mar.

No presente trabalho, implementamos um modelo numérico oceânico, acoplado a um modelo Lagrangeano, para estudos de caso em áreas de fontes hidrotermais ricas em PMS, de forma a representar a circulação de submesoescala a mesoescala do mar profundo, bem como as características relacionadas com as restrições topográficas e perturbações no campo de densidade. Considerando a metodologia adotada, que se concentrou na dinâmica da região de campo distante de um local de mineração, os padrões de distribuição dos fragmentos de rocha observados ao redor da área das fontes hidrotermais, estiveram fortemente ligados à circulação local. Os diferentes tempos de residência dos fragmentos de rocha na coluna de água mostram a influência da topografia local na dinâmica dos fragmentos.

As partículas e fragmentos de rocha libertados durante a mineração têm um impacto físico nos organismos bentónicos, limitando algumas atividades funcionais básicas devido à cobertura dos organismos e à abrasão. Além disso, as partículas de PMS ressuspensas liberam grandes quantidades de oligoelementos (por exemplo, cobalto, manganês, cobre) para a fase dissolvida, que ocorrem em curta escala de tempo (minutos), aumentando em concentração com o tempo. Esses podem induzir efeitos bioquímicos, levando à morte de organismos (e.g. corais). A distância alcançada e o tempo de residência dos fragmentos de rocha na coluna de água estão diretamente relacionados com a extensão e severidade desses impactos.

Os resultados obtidos sugerem que, para os campos hidrotermais considerados, diferentes áreas de exclusão na região NMAR devem ser consideradas para definir Áreas de Interesse Particular (APEI). Essas áreas representam regiões que devem ser protegidas de atividades humanas, sendo projetadas no âmbito de uma gestão preventiva da mineração em alto mar. No entanto, diversos fatores devem ser considerados para delimitar regiões de importância ambiental e econômica, tais como a variabilidade hidrodinâmica intra e interanual, a distribuição da biota e a sensibilidade dos ecossistemas a padrões sazonais e intersazonais. Para atingir esse objetivo, estudos futuros deverão considerar o acoplamento dos modelos oceânicos e de dispersão aqui implementados com modelos ecológicos, permitindo avaliar como os organismos bentónicos e todo o ecossistema são

impactados por atividades de mineração em alto mar.

AGRADECIMENTOS

Esta investigação foi parcialmente apoiada pelo Financiamento Estratégico UIDB/04423/2020, UIDP/04423/2020 e LA/P/0101/2020 através de fundos nacionais disponibilizados pela FCT, e pelo Projeto DeepRisk, PTDC/CTA-AMB/7948/2020. I. Iglesias agradece o financiamento da FCT através do programa CEEC (2022.07420.CEECIND).

REFERÊNCIAS

- [1] Hein, J., K. Mizell, A. Koschinsky and T. Conrad (2013): Deep-ocean mineral deposits as a source of critical metals for high- and green-technology applications: comparison with land-based resources, *Ore Geol. Rev.* 51, 1–14.
- [2] Dunn, D., et al. (2018): A strategy for conservation of biodiversity on mid-ocean ridges from deep-sea mining, *Sci. Adv.*, 4, 16pp.
- [3] ECORYS (2014): Study to investigate the state of knowledge of deep sea mining, FWC MARE/2012/06-SCE1/2013/04, 80pp.
- [4] Peacock, T. and R. Oullion (2023): The fluid mechanics of deep-sea mining, *Annu. Rev. Fluid Mech.* 55(403), 30pp.
- [5] Elerian, M., S. Alhaddad, R. Helomns and C. Van Rhee (2021): Near-field analysis of turbidity flows generated by polymetallic nodule mining tools. *Mining*, 1(3), 251-278.
- [6] Post, J., V. Schreiner and L. Weixler (2021): The 'vertical approach' - a sustainable solution for deep-sea mining and sampling, *Mining Report*, 157(3), 10pp.
- [7] Washburn, T., et al. (2023): Impacts of the first deep-sea seafloor massive sulfide mining excavation tests on benthic communities, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 712, 1–19.
- [8] Aleynik, D., M. Inall, A. Dale and A. Vink (2017): Impact of remotely generated eddies on plume dispersion at abyssal mining sites in the Pacific, *Sci. Rep.*, 7, 16959.
- [9] Coffey (2008): Environmental impact statement: solwara-1 project
- [10] Lopes, C., L. Bastos, M. Caetano, I. Martins, M. Santos and I. Iglesias (2019): Development of physical modelling tools in support of risk scenarios: a new framework focused on deep-sea mining, *Sci. Total Environ.*, 650, 2294–2306.
- [11] Morato, T., M. Juliano, C. Pham, M. Carreiro-Silva, L. Martins and A. Colaço (2022): Modelling the dispersion of seafloor massive sulphide mining plumes in the Mid-Atlantic ridge around the Azores, *Front. Mar. Sci.*, 9.
- [12] She, J. and J.M. Klinck (2000): Flow near submarine canyon driven by constant winds, *J. Geophys. Res.*, 105(C12), 28671-28694.
- [13] Kampf, J. (2006): Transient wind-driven upwelling in a submarine canyon: a process-oriented modelling study, *J. Geophys. Res.*, 111(C11).
- [14] Amorim, F.N, M. Cirano, M. Marta-Almeida, J.F. Middleton and E.J.D. Campos (2013): The seasonal circulation of the Eastern Brazilian shelf between 10S and 16S, *Continental Shelf Res.*, 65, 121-140.
- [15] Pires, R., A. Peliz and A. Santos (2021): Into the deep - Dispersal models for deep-water decapod shrimp larvae: The case of *Parapenaeus longirostris*, *Prog. Oceanogr.*, 194, 102568.
- [16] Peliz, A., P. Marchesiello, J. Dubert, M. Marta-Almeida, C. Roy and H. Queiroga (2007): A study of crab larvae dispersal on the Western Iberian Shelf: physical processes, *J. Mar. Syst.*, 68(1-2), 215-236.
- [17] Marta-Almeida, et al. (2013): Efficient tools for marine operational forecast and oil spill tracking, *Mar. Pollut. Bull.*, 17(1-2), 139-151.

- [18] Vaz, A., R. Faillietaz and C. Paris (2021): A coupled Lagrangian-Earth system model for predicting oil photooxidation, *Front. Mar. Sci.*, 8.
- [19] Marta-Almeida, M., R. Mendes, F. Amorim, M. Cirano and J. Dias (2019): Fundão dam collapse: oceanic dispersion of river doce after the greatest Brazilian environmental accident, *mar, Poll. Bull.* 112(1-2), 359-364.
- [20] Putman, N. and R. He (2013): Tracking the long-distance dispersal of marine organisms: sensitivity to ocean model resolution, *J. R. Soc. Interface*, 10(81).
- [21] Boschen-Rose, R. and A. Colaço (2021): Northern Mid-Atlantic Ridge hydrothermal habitats: a systematic review of knowledge status for environmental management, *Front. Mar. Sci.*, 8, 23p.
- [22] Fouquet, Y., P. Cambon, C. Mevel, G. Meyer and P. Gente (2018): Tectonic setting and mineralogical and geochemical zonation in the snake pit sulfide deposit (mid-atlantic ridge at 23 degrees N), *Econ. Geol.*
- [23] Charlou, J., et al. (2000): Compared geochemical signatures and the evolution of menez gwen and lucky strike hydrothermal fluids, south of the azores triple junction on the mid-atlantic ridge, *Chem. Geol.*, 171(1-2), 49-75.
- [24] Dias, A. and F. Barriga (2006): Mineralogy and geochemistry of hydrothermal sediments from the serpentinite-hosted saldanha hydrothermal field at MAR, *Mar. Geol.*, 225(1-4), 157-175.
- [25] Birney, K., A. Griffin, J. Kefauver, T. Nagai and D. Varchol (2007): Potential deep-sea mining of seafloor massive sulfides: a case study in Papua New Guinea, *Donald Bren School of Environ. Sci. and Manag.*, 1, 117pp.
- [26] Lett, C., et al. (2008): A Lagrangian tool for modelling ichthyoplankton dynamics, *Environ. Model. Software*, 23(9), 1210-1214.
- [27] Ferguson, R. and M. Church (2004): A simple universal equation for grain settling velocity, *J. Sediment. Res.*
- [28] Shchepetkin, A.F. and J.C. McWilliams (2005): The regional oceanic modelling systems (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model, *Ocean Model.*, 9(4), 347-404.
- [29] Egbert, G.D. and S.Y. Erofeeva (2002): Efficient inverse modelling of barotropic ocean tides, *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 19(2), 183-204.
- [30] Hersbach, H. et al. (2023): ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS).
- [31] Amorim, F.N., Caetano, M., Bastos, L., Iglesias, I. (2024): Deep-sea mining rock-fragments dispersal scenarios associated with submesoscale forcings: A case study in the Atlantic, *Heliyon*, 10(e34174).
- [32] Aleynik, D. et al. (2017). Impact of remotely generated eddies on plume dispersion at abyssal mining sites in the Pacific. *Sci. Rep.* 7(16959).

S.07

Hidrologia
Hidrología

Indicadores de desempenho em resposta a seca hidrológica nos aquíferos do Algarve

Performance indicators in response to hydrological drought in the Algarve's aquifers

Neves, Maria C. ^(1,2)

(1) Universidade do Algarve, FCT, Campus de Gambelas, Faro, Portugal

(2) IDL, Instituto Dom Luiz, FCUL, Lisboa, Portugal

Autor correspondente: mcneves@ualg.pt

SUMMARY

Aquifers in semi-arid coastal regions such as the Algarve are severely affected by droughts. Excessive groundwater abstraction exacerbates the situation, leading to the degradation of water quality and the risk of saline intrusion. Thoroughly monitoring using various indicators is crucial to predicting and mitigating the consequences of drought. This study proposes a methodology that involves calculating performance indicators based on the Standardized Groundwater Index (SGI) and the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI). Atmospheric reanalysis data and in situ groundwater level observations are used to determine the aquifers' memory and to find optimal accumulation times for the SPEI at each well. The inverse of the memory calculated from the SGI's autocorrelation provides the best estimate of each well's recovery capacity under drought conditions, offering a reliable indication of resilience and sustainability. The SPEI calculated for an accumulation time of 12 months (SPEI-12) best captures the average regional variability of groundwater levels. However, aquifer memories and optimal SPEI accumulation times vary greatly spatially, ranging from SPEI-5 to SPEI-48. Wells with shorter memories (< 6 months) demonstrate greater sustainability, while those with longer memories (> 16 months), inland or along the coast, exhibit lower resilience and sustainability. This work identifies the wells with the least resilience that require intensified monitoring to adapt water management strategies.

PALAVRAS-CHAVE

Drought, Aquifer, Performance, SPEI, SGI, Sustainability, Water Resources, Algarve. Seca, Aquífero, Desempenho, SPEI, SGI, Recursos Hídricos, Algarve.

INTRODUÇÃO

As águas subterrâneas desempenham um papel vital na sustentação dos ecossistemas e na segurança alimentar durante as secas. As alterações climáticas, nomeadamente o aumento das temperaturas e a redução da precipitação, estão a agravar as situações de escassez de água em zonas semiáridas e a colocar em risco a sustentabilidade dos aquíferos costeiros. Apesar da necessidade urgente de monitorizar e gerir os recursos hídricos, a natureza heterogénea dos aquíferos torna difícil avaliar e prever o estado quantitativo das águas subterrâneas. O Índice Padronizado de Níveis de Água Subterrânea ou *Standardized Groundwater Index* (SGI) emergiu como um índice comparável com outros índices meteorológicos de seca (Bloomfield and Marchant, 2013) e oferece uma alternativa ao limiar do percentil 20 da série histórica do nível piezométrico, tradicionalmente usado pela Agência Portuguesa do Ambiente para classificar o estado quantitativo das massas de água subterrânea. Este estudo foca-se no Algarve, uma região mediterrânica semiárida com aquíferos costeiros fortemente impactados pela seca. Ao comparar diferentes índices de seca, como o SGI, o Índice Padronizado de Precipitação e Evapotranspiração (SPEI) e indicadores de desempenho, a investigação procura fornecer melhores ferramentas para a gestão das águas subterrâneas. O objetivo é melhorar a capacidade de antecipar secas e implementar estratégias de mitigação, contribuindo para uma gestão mais sustentável dos recursos hídricos.

DADOS E MÉTODOS

A região do Algarve (Figura 1) está atualmente a enfrentar uma seca sem precedentes, com os níveis de águas subterrâneas na maioria dos locais a permanecerem abaixo do 20.º percentil desde 2018. Isto tem levado à elaboração de planos para restrições de consumo, tanto a nível doméstico como na agricultura. Os aquíferos considerados na região, designados de M1 a M17, são essencialmente sistemas cársticos semi-confinados ou mistos cárstico-porosos (Tabela 1). Os registos dos níveis de águas subterrâneas estão disponíveis através do Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (SNIRH, 2024). Este estudo baseia-se numa seleção de 16 piezómetros distribuídos por 12 aquíferos (Figura 1), com registos mensais desde janeiro de 1990

até dezembro de 2022. A seleção foi feita com base na duração, continuidade e consistência das séries temporais, amostrando o maior número possível de aquíferos. Apenas metade dos registos abrange todo o período de análise, mas todos têm pelo menos 10 anos de observações e lacunas inferiores a 6 meses. Antes da análise, os passos de pré-processamento incluíram o uso de interpolação para estimar valores em falta. Todos os cálculos foram feitos utilizando Python.

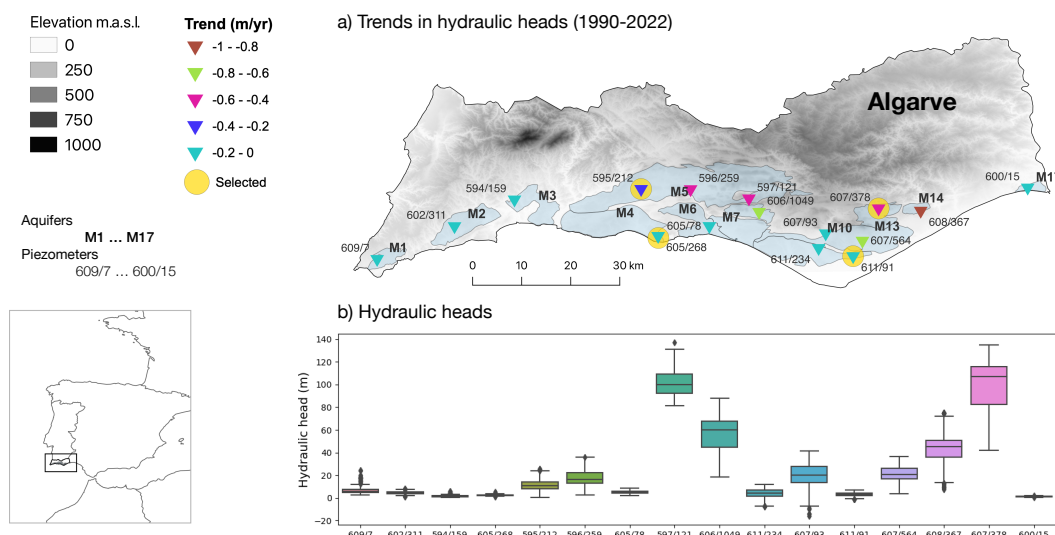


Figura 1: Localização da área de estudo mostrando os aquíferos estudados (M1 a M17). (a) Os triângulos invertidos representam a localização dos 16 piezômetros selecionados para análise e a tendência dos níveis de águas subterrâneas em cada local. (b) Gráfico de caixa e bigodes dos dados de nível piezométrico (m.a.s.l.) entre 1990 e 2022. As extremidades das caixas correspondem aos percentis 25 e 75, e os bigodes estendem-se aos valores mínimos e máximos dos níveis hidráulicos observados.

A primeira etapa da metodologia incluiu a análise da tendência dos níveis de águas subterrâneas (GWL), o cálculo de diferentes índices de seca e a comparação das memórias. A tendência dos níveis hidráulicos foi calculada utilizando o teste de Mann-Kendall (MK). Os índices de seca podem, em geral, ser classificados em índices padronizados e índices baseados em limiares. Uma vez que a escolha do limiar é sempre uma decisão subjetiva, por razões práticas, os limiares são frequentemente derivados de percentis. Este estudo adota o percentil 20 da série temporal dos níveis de águas subterrâneas como o valor de limiar em cada local, referido a partir de agora como P20. Os índices de seca padronizados representam anomalias em relação a uma situação normal de forma padronizada, como o Índice de Precipitação Padronizada (SPI). Embora o SPI tenha sido calculado para fins comparativos, este estudo opta pelo Índice Padronizado de Precipitação e Evapotranspiração (SPEI), que é mais adequado para regiões semiáridas onde a temperatura desempenha um papel fundamental (Vicente-Serrano et al., 2010). O SPEI considera, geralmente, as anomalias acumuladas do balanço hídrico climático (precipitação menos evapotranspiração potencial, ou P-E) ao longo de várias escalas temporais (por exemplo, 1, 3, 6, 12 meses ou mais). O método utilizado para estimar as séries temporais do SGI e do SPEI difere do método tradicional usado para o cálculo do SPI. Muitos estudos recentes sobre secas adotaram abordagens não paramétricas, onde, em vez do ajuste convencional de uma função de distribuição paramétrica à precipitação, as probabilidades de precipitação observada (ou de outras variáveis hidrológicas) são calculadas empiricamente. Para o SGI, por exemplo, Bloomfield e Marchant (2013) descobriram que não era possível encontrar uma única função de distribuição ótima que se ajustasse a todos os registos de águas subterrâneas em diferentes locais. Além disso, a função de distribuição ajustada variava de mês para mês em um local específico. Neste estudo, adotamos a sua abordagem e estimamos o SGI utilizando a *normal score transform* (Neves, 2024).

Tabela 1 Tipo de aquífero, tendência dos níveis de águas subterrâneas (GWL), memória, período de acumulação ótimo do SPEI e Duração Média da Seca (MDD) calculada utilizando o percentil 20 e o SGI como limiares. SCK: cárstico semi-confinado, SCKP: cárstico semi-confinado e poroso; SCC: carbonato semi-confinado, SCM: multicamadas semi-confinado, UP: poroso não confinado.

Aquífero	Tipo	Código do Piezômetro	GWL Desvio padrão (m)	GWL Tendência Mann-Kendall (m/yr)	GWL memória (meses)	SGI memória (meses)	SPEI_time	SGI-SPEI Pearson's coef.	GWL MDD (meses)	SGI MDD (meses)
M1	SCK	609/7	3.6	-0.140	5	5	SPEI_5	0.697	13	4
M2	SCK	602/311	1.2	-0.030	16	15	SPEI_18	0.792	12	13
M3	SCKP	594/159	0.9	-0.018	4	5	SPEI_4	0.82	6	4
M4	SCKP	605/268	0.5	0.000	14	10	SPEI_10	0.713	6	5
M5	SCK	595/212	4.8	-0.25	18	17	SPEI_24	0.79	11	16
M5	SCK	597/121	11.5	-0.515	6	7	SPEI_7	0.721	6	7
M5	SCK	596/259	6.9	-0.393	18	16	SPEI_22	0.822	13	20
M6	SCC	605/78	1.4	-0.029	15	13	SPEI_15	0.711	5	8
M7	SCK	606/1049	16.5	-0.621	9	8	SPEI_12	0.829	6	6
M10	SCC	607/93	10.3	0.12	15	11	SPEI_13	0.778	6	5
M10	SCC	607/564	7.3	-0.723	15	11	SPEI_11	0.861	6	6
M12	SM	611/234	4.1	-0.065	17	19	SPEI_36	0.828	6	20
M12	SM	611/91	1.6	-0.018	26	21	SPEI_48	0.752	10	7
M13	SCK	607/378	22.3	-0.406	5	6	SPEI_11	0.679	5	5
M14	SCK	608/367	15.2	-0.951	16	13	SPEI_16	0.864	12	12
M17	UP	600/15	0.3	-0.020	4	9	SPEI_10	0.685	4	4

As funções de autocorrelação representam a dependência linear de um evento nos valores subsequentes da série temporal e são usadas para quantificar o efeito de memória dos sistemas hidrológicos, um parâmetro que tem implicações para a persistência das secas. Este estudo avalia a memória tanto dos registos de níveis hidráulicos (memória do GWL) quanto das séries temporais do SGI (memória do SGI) para explorar e comparar a sua relação com o SPEI. O auto-correlograma é o gráfico da correlação de uma série temporal consigo mesma após ser deslocada por intervalos de tempo (lags) cada vez maiores. A capacidade do SPEI de captar a seca nas águas subterrâneas foi avaliada ao calcular o coeficiente de correlação de Pearson entre as séries temporais do SPEI e do SGI. O objetivo era determinar as acumulações e lags do SPEI necessários para alinhar os sinais meteorológicos com os níveis de águas subterrâneas. Para encontrar o melhor período de acumulação, o SPEI foi calculado em cada local de piezômetro com períodos de acumulação variando entre 1 e 48 meses, com passos de 1 mês. O coeficiente de correlação de Pearson, o valor p correspondente e o lag de correlação máxima foram determinados entre o SGI e cada uma das 48 séries temporais de SPEI em cada local de piezômetro. Os melhores períodos de acumulação do SPEI, designados aqui como SPEI_time, são aqueles que proporcionam a máxima correlação em cada local.

A terceira e última etapa da metodologia foi a avaliação de indicadores de desempenho, nomeadamente, fiabilidade, resiliência, vulnerabilidade e sustentabilidade, que são comumente utilizados para caracterizar o desempenho estocástico dos sistemas de

recursos hídricos (Peters et al., 2005). Estes indicadores são formulados em termos de medidas estatísticas e descrevem quanto provável é que um sistema falhe (fiabilidade), quanto rapidamente ele recupera da falha (resiliência), quanto severas podem ser as consequências da falha (vulnerabilidade) e, por último, quanto sustentável é o sistema de acordo com a definição de sustentabilidade de Loucks: “Sistemas de recursos hídricos sustentáveis são aqueles projetados e geridos para contribuir plenamente para os objetivos da sociedade, agora e no futuro, enquanto mantêm a sua integridade ecológica, ambiental e hidrológica” (Loucks, 1997). A novidade aqui é que, em vez de usar o GWL para calcular os indicadores de desempenho, este estudo calcula os indicadores de desempenho utilizando as séries temporais do SGI em cada local, para diferentes escolhas de limiares. Condições satisfatórias e insatisfatórias significam valores do SGI acima ou abaixo do limiar, respetivamente.

A fiabilidade representa a probabilidade de que o SGI fique abaixo do limiar e é dada por: $REL = (\text{Número de condições satisfatórias}) / (\text{Número total de condições})$. A resiliência fornece uma indicação da capacidade de retornar a uma condição satisfatória após uma condição insatisfatória: $RES = (\text{Número de vezes que uma condição satisfatória segue uma condição insatisfatória}) / (\text{Número total de condições insatisfatórias})$. Outra forma de definir a resiliência é considerar o inverso da duração média da seca de águas subterrâneas em cada local (Zeydinejad, 2023). Dado que a memória é um proxy da duração da seca, uma estimativa alternativa de resiliência também pode ser calculada como o inverso da memória SGI. A vulnerabilidade é definida como uma medida probabilística que considera a extensão e a magnitude de uma condição insatisfatória:

$$Vul = \sum s_j e_j \quad (\text{Eq. 1})$$

onde s_j é a magnitude (ou severidade) da condição insatisfatória e e_j é a probabilidade dessa magnitude ser atingida durante o intervalo de tempo da série temporal. Finalmente, o índice de sustentabilidade é definido como (Peters et al., 2005):

$$SUS = REL * RES_1 * (1 - VUL) \quad (\text{Eq. 2})$$

RESULTADOS

As tendências nos níveis das águas subterrâneas calculadas de acordo com o teste de Mann-Kendall (MK) são apresentadas na Tabela 1 e exibidas como triângulos invertidos na Figura 1a. Os níveis das águas no Algarve têm diminuído de forma generalizada e consistente. As tendências mais negativas são observadas em locais de maior altitude, como no piezómetro 607/378 no aquífero M13. Isto ocorre porque os défices de precipitação têm um efeito mais significativo nas encostas das colinas, onde a recarga depende principalmente da infiltração direta. Esses piezómetros também exibem as maiores variações de amplitude dos níveis de água (Fig. 1b). Para sul, os aquíferos costeiros situados próximo do nível do mar e com pequenas profundidades até o lençol freático apresentam pequenas variações de amplitude nas cargas hidráulicas. Esta característica, tipicamente observada em planícies de descarga costeira, tem um papel crítico na identificação de secas, como será discutido mais tarde.

As séries temporais do nível de água (GWL) são apresentadas para quatro piezómetros selecionados, considerados representativos de todo o conjunto de piezómetros em análise (Fig. 2). Os registos mostram padrões oscilatórios visivelmente distintos associados à topografia e à elevação da carga hidráulica. Piezómetros baixos próximos da costa mostram flutuações muito pequenas, refletindo principalmente o ciclo anual de precipitação (611/91, 605/268). As cargas hidráulicas nestas regiões podem cair abaixo do nível do mar durante secas prolongadas, como aconteceu no local 611/91 em 1995–1996 e recorrentemente em 2019–2022. Piezómetros em altitudes mais elevadas (607/378) apresentam uma maior componente de oscilações de baixa frequência, com períodos dominantes de 6 a 10 anos sobrepostos nas flutuações do ciclo anual, conforme já descrito em estudos anteriores (Neves et al., 2019). Estas variações de baixa frequência estão principalmente associadas à Oscilação do Atlântico Norte (NAO), que é o principal padrão climático de grande escala que influencia a precipitação na região.

Também se mostra na Figura 2 o percentil 20 (P20) do nível das águas subterrâneas nos piezómetros selecionados (linhas sólidas cinza). Em Portugal, as autoridades identificam um aquífero como estando em estado quantitativo crítico quando o GWL atinge o limiar P20. Os círculos marcam o início da seca hidrológica conforme definido por este limite. As barras amarelas representam as principais secas meteorológicas regionais identificadas pelo Instituto Português do Mar e da Atmosfera. Dependendo do piezómetro, algumas secas meteorológicas não se propagam para os aquíferos ou não são identificadas pelo limiar P20.

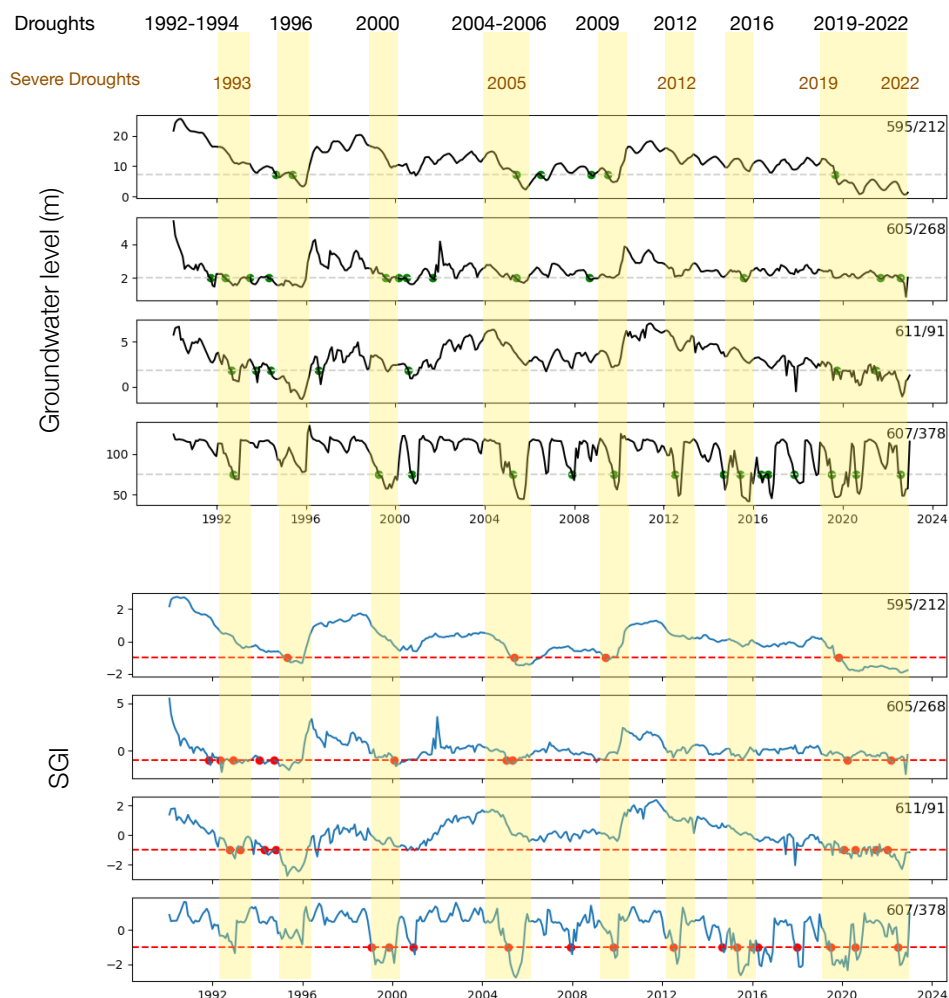


Figura 2: Séries piezométricas e SGI em quatro piezómetros representativos: dois localizados no interior do Algarve (595/212 e 607/378) e dois próximos do mar (605/268 e 611/91). As linhas tracejadas representam o limiar P20 (cinzento) e o limiar SGI (vermelho) para secas moderadas (-1). Os pontos verdes assinalam o início da seca de acordo com o P20, e os pontos vermelhos assinalam o início da seca de acordo com o indicador SGI. As barras amarelas indicam a ocorrência de secas meteorológicas regionais.

A Figura 2 mostra também a série temporal do SGI cujo cálculo é baseado em desvios padronizados relativos à climatologia mensal. A padronização atua como um filtro passa-baixa que atenua ou remove as altas frequências associadas às oscilações do ciclo sazonal e anual. Ao comparar GWL e SGI, fica evidente que esta atenuação tem maior impacto nos piezómetros situados perto do nível do mar devido às pequenas variações de GWL (por exemplo, 611/91). O valor limite do SGI assumido para declarar seca é subjetivo e varia entre diferentes estudos. Aqui, é assumido um limite SGI comum a todos os piezómetros e igual a -1.0 , determinado a partir de um estudo de sensibilidade descrito em detalhe no artigo Neves (2024).

O histograma do número de secas por mês do ano fornece uma indicação da capacidade dos índices de antecipar as secas (Fig. 3), o que pode ser importante para fins de gestão e planeamento. Enquanto o P20 deteta secas principalmente nos meses de verão (junho a setembro), quando a seca meteorológica atinge o seu pico, o SGI tem a vantagem de antecipar o alarme em alguns meses, com picos no inverno, particularmente em dezembro e janeiro.

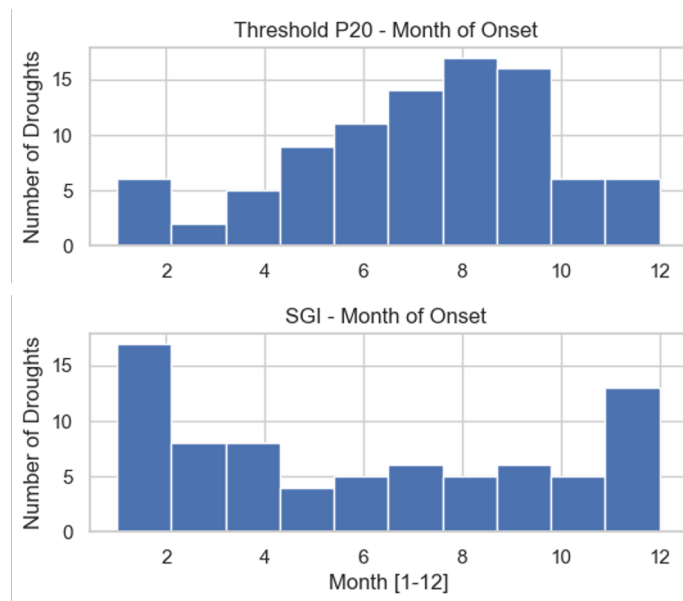


Figura 3: Histograma do número de secas (contagens do número de inícios de secas – pontos verdes e vermelhos como se mostra na Figura 2) em função do mês (1 para janeiro e 12 para dezembro) considerando a totalidade dos piezómetros (16) deste estudo.

Para verificar a adequação do SPEI como proxy do SGI, este estudo determina o período de acumulação do SPEI que produza a melhor correlação entre as séries temporais do SPEI e do SGI (Tabela 1). O SPEI_{time} indica o tempo de acumulação (em meses) que produz o maior coeficiente de correlação de Pearson. Os melhores resultados da correlação são altamente significativos, pois os valores de p são todos inferiores a 0.001. É evidente que não existe um período de acumulação ideal único que se ajuste a todas as observações de águas subterrâneas e, na verdade, esta varia amplamente entre 4 e 48 meses na área de estudo.

A memória representa o tempo que o GWL leva para responder aos sinais meteorológicos. A memória do sistema é calculada com base na autocorrelação do GWL e na autocorrelação do SGI (Fig. 4) cujo cálculo é descrito com mais detalhe em Neves (2024). A memória GWL é considerada a lag correspondente a um coeficiente de autocorrelação de 0,2 (Neves et al., 2016). Não há diretrizes para a escolha do coeficiente de autocorrelação do SGI. Aqui é definido como 0.3 porque este é o valor que fornece o melhor compromisso entre as memórias SGI e GWL (Tabela 1). No entanto, as memórias variam amplamente entre os diferentes piezómetros e têm uma distribuição espacial muito heterogénea. A memória GWL varia entre 5 e 26 meses enquanto a memória SGI varia entre 5 e 21 meses. Locais com memórias mais curtas apresentam episódios rápidos ou repentinos de recessão e recuperação (por exemplo, 697/378), enquanto locais com memórias mais longas apresentam variações mais suaves e ciclos de longo prazo (por exemplo, 611/91).

A Memória e o SPEI_{time} possuem uma relação de proporcionalidade direta descrita por um polinómio de 2ª ordem (Fig. 4). O ajuste polinomial é melhor para SGI do que para GWL. O tempo ótimo de acumulação do SPEI, bem como a memória, representam a inércia para responder ao balanço entre a precipitação e a evapotranspiração (P-E) e podem ser considerados um proxy da persistência ou duração das secas das águas subterrâneas. Espera-se que quanto mais longos forem os tempos de memória, menos frequentes e mais longas serão as secas. Isto é observado na maioria dos piezómetros do Algarve, mas é particularmente evidente no piezómetro 595/212, com uma memória de 17 meses e apenas um pequeno número de secas muito longas (Fig. 2). Estes locais têm propriedades hidrogeológicas de filtragem passa-baixo, tais como formações superficiais espessas e, portanto, tempos de recarga mais longos, ou quantidades significativas de armazenamento/volume de água na rede cárstica.

A autocorrelação da recarga é essencialmente uma função da espessura da zona saturada. Uma espessura maior resulta na diminuição da amplitude dos sinais de alta frequência, enquanto uma espessura menor leva a episódios de seca mais curtos, mas mais severos. As exceções ocorrem quando poços rasos com finas zonas não saturadas, ou pequenas profundidades até o lençol freático, têm memória longa (Kumar et al., 2016). Este é o caso dos piezómetros do aquífero M12 onde as longas memórias (grandes autocorrelações) podem ser explicadas pelos volumes significativos de recarga indireta (Neves et al., 2019). Quanto às

características de drenagem do aquífero, a transmissividade é responsável por dissipar pulsos rápidos de recarga. A capacidade de armazenamento é outro fator influente na atenuação de flutuações frequentes e rápidas. Como resultado, aquíferos com maior capacidade de armazenamento e grande transmissividade, como por exemplo o aquífero M5 (Neves et al., 2016), tendem a apresentar maiores memórias e pequena resiliência às secas.

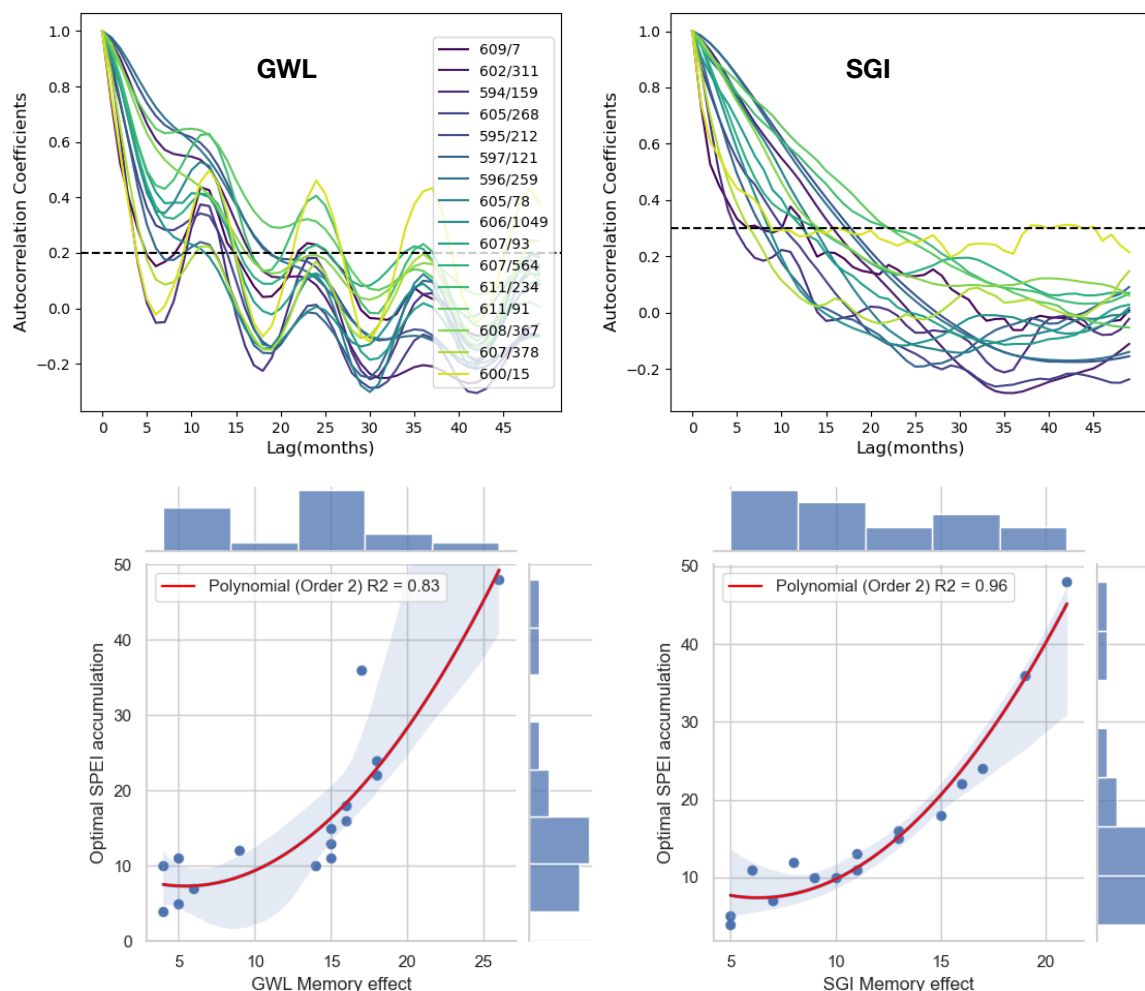


Figura 4: Gráficos da função de autocorrelação do nível da água (GWL) e do SGI para os 16 piezómetros considerados. As linhas tracejadas mostram os valores específicos assumidos para o cálculo da memória (0,2 para GWL e 0,3 para SGI) no Algarve. A relação entre o período ótimo de acumulação e a memória nos 16 locais é descrita por um polinómio de 2ª ordem em ambos os casos com sombreamento indicando o nível de confiança do ajuste de 95%. O ajuste é melhor para SGI do que para GWL (coeficiente de determinação R^2 0.96 e 0.83, respetivamente). Um R^2 de 0,96 significa que 96% da variância nos dados é explicada pelo modelo polinomial e implica que o modelo SGI tem maior capacidade de prever dados futuros do que o modelo GWL.

A análise dos indicadores de desempenho é feita com mais detalhe em Neves (2024) incluindo-se aqui apenas um resumo dos resultados principais. A fiabilidade indica a capacidade de um poço fornecer água sem atingir um estado quantitativo crítico. A fiabilidade é inversamente proporcional valor limite de SGI definido para declarar seca, pois maior fiabilidade implica limites mais extremos que são alcançados com menos frequência. A resiliência (RES), pelo contrário, é diretamente proporcional ao limiar crítico. Quanto mais negativo for o limiar, menor será a resiliência. A utilização de índices para determinar o início da seca e definir classes de seca é um desafio, uma vez que o início depende fortemente de limiares críticos utilizados, particularmente em aquíferos de planície costeira onde as flutuações do nível da água são pequenas. Como resposta, devermos adotar uma abordagem flexível que englobe vários limiares e diferentes indicadores.

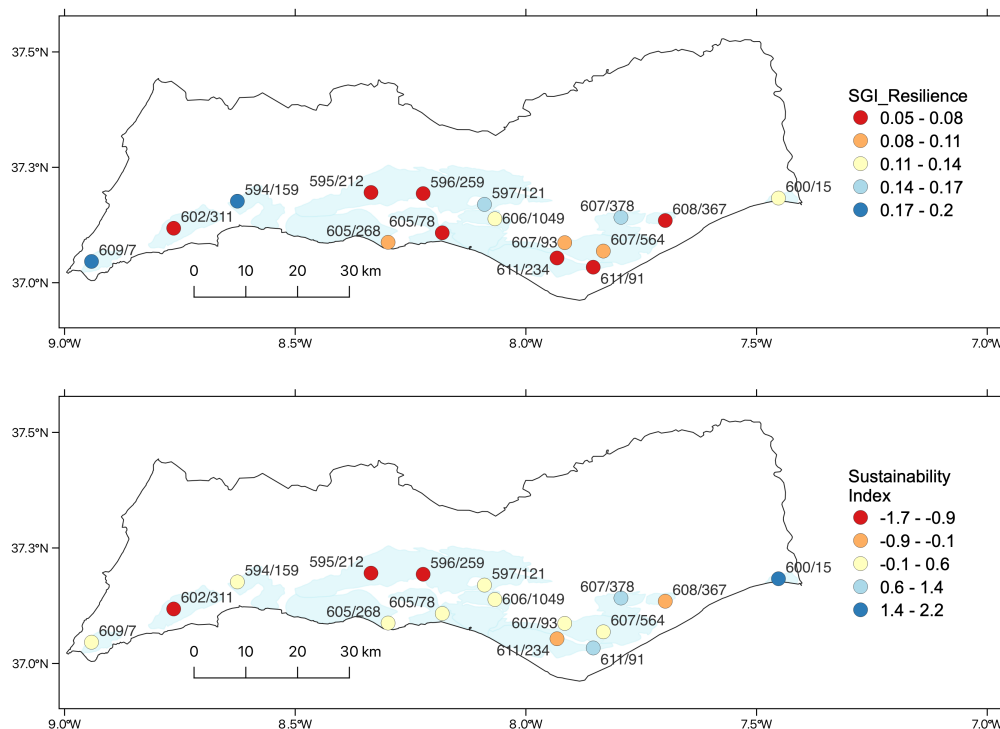


Figura 5: Mapas mostrando a distribuição espacial da resiliência, calculada como o inverso da memória do SGI (topo), e do índice de sustentabilidade normalizado, calculado a partir da série temporal SGI assumindo um limiar de seca moderada (–1) em cada local. A resiliência do SGI fornece uma melhor avaliação da sustentabilidade em resposta à seca nos poços ao longo da costa com memórias longas e níveis freáticos próximos do nível do mar (611/234 e 611/91).

Os mapas da Figura 5 mostram a distribuição espacial da resiliência, calculada como o inverso da memória do SGI, e da sustentabilidade (que reflete essencialmente o indicador de desempenho resiliência ou RES), ambos utilizando o valor do limiar do SGI igual a –1 para definir condições de seca. A maioria dos piezómetros perto da costa mostram baixa resiliência e, portanto, baixa sustentabilidade à seca. Os sítios com menor sustentabilidade são os furos 602/311, 595/212 e 596/259, todos com memórias próximas de 15 meses. Curiosamente, os piezómetros com as maiores memórias (611/91 e 611/234) não são classificados como tendo a menor sustentabilidade. Isto deve-se à sua elevada sensibilidade ao valor limite que distorce a estimativa de sustentabilidade. Neste caso, o inverso da memória SGI é um melhor indicador de sustentabilidade, uma vez que memórias maiores indicam tempos de recuperação mais longos da seca.

Os especialistas geralmente concordam que não existe um índice perfeito para descrever a seca das águas subterrâneas, porque há uma infinidade de índices e cada um analisa um aspeto particular do ciclo da água. Para interpretar e captar totalmente os vários efeitos da seca, recomenda-se, portanto, a utilização de múltiplos índices. O caso-estudo do Algarve mostra que tanto a memória como o período de acumulação do SPEI podem servir como ferramentas eficazes para caracterizar e monitorizar as condições de seca, mas os cálculos devem ser realizados individualmente em cada local.

CONCLUSÕES

A seca de águas subterrâneas é uma preocupação global crescente devido aos seus impactos adversos, socioeconómicos ou naturais. A abordagem e os métodos utilizados neste estudo podem ser aplicados a outras regiões mediterrânicas semiáridas costeiras que enfrentam tendências de secagem, como o Algarve. Podem ser tiradas as seguintes conclusões:

1. Os valores-limite utilizados para determinar o início das secas, os intervalos de classes de seca e as subsequentes características da seca, como a duração, são delicados e devem seguir uma abordagem de teste de sensibilidade. Independentemente do método, a escolha do valor-limite é particularmente crítica em piezómetros costeiros próximos ao nível do mar, com pequenas variações do nível de água subterrânea (GWL).

2. O SGI apresenta várias vantagens sobre o método do percentil 20 para identificar a seca de águas subterrâneas, nomeadamente, uma estimativa mais robusta da memória do sistema, proporcionando uma melhor correspondência com o SPEI ótimo, e uma maior capacidade de detetar a seca precocemente. O percentil 20 aciona o alarme mais frequentemente nos meses de verão, quando a seca já está no seu auge, enquanto o SGI pode antecipar o início da seca nas estações anteriores de inverno e primavera.
3. O SPEI consegue capturar a maioria dos principais aspetos relevantes para estudos de seca de água subterrâneas a nível regional. Em regiões áridas e semiáridas como o Algarve, o SPEI fornece uma estimativa mais robusta da seca e fornece uma melhor correspondência com as observações de águas subterrâneas do que indicadores baseados apenas em precipitação, como o SPI. No entanto, o tempo de acumulação ótimo do SPEI deve ser calculado em cada poço individual devido às características hidrogeológicas específicas de cada local.
4. A sustentabilidade em relação à seca, definida de acordo com critérios de desempenho, é essencialmente uma função da resiliência, que mede a capacidade de um poço suportar condições desfavoráveis e recuperar para condições normais médias. Os indicadores de desempenho não distinguem os forçamentos externos naturais (climáticos) dos antropogénicos (bombagem) mas são úteis para identificar rapidamente poços que necessitem de vigilância prioritária.
5. A resiliência à seca é bem descrita pela memória dos níveis de água subterrânea em cada local. A memória é um parâmetro robusto que mostra boa concordância, independentemente do método de cálculo utilizado; ou seja, as estimativas derivadas das autocorrelações do GWL, autocorrelações do SGI ou períodos de acumulação ótimos do SPEI são consistentes entre si. Além disso, o inverso da memória fornece uma estimativa mais fiável da resiliência em poços costeiros com níveis próximos ou abaixo do nível do mar, sob risco de intrusão salina.
6. No Algarve, a seca moderada de águas subterrâneas pode ser definida por um valor-limite de SGI igual a -1. Poços com resposta de curto prazo ao P-E ($SPEI_{time} < 6$ meses) são classificados como resilientes e sustentáveis. Poços com grandes memórias ($SPEI_{time} > 18$ meses) são os menos resilientes à seca e os menos sustentáveis. A maioria dos outros poços tem memórias próximas de 12 meses, indicando que o SPEI-12 é o tempo de acumulação médio que produz a melhor correlação com a variabilidade do nível das águas subterrâneas na região.

Em resumo, a avaliação das respostas dos aquíferos à seca em regiões costeiras deve incluir a quantificação de métricas de sustentabilidade. Monitorizar a evolução da seca e os indicadores de desempenho ao longo do tempo proporciona informações valiosas e pode orientar o desenvolvimento de soluções de gestão adaptadas. As conclusões deste estudo apoiam a importância de empregar métodos complementares na monitorização da seca. A integração de indicadores ou índices complementares pode fornecer uma compreensão mais abrangente das dinâmicas da seca em regiões áridas e semiáridas. Como este estudo demonstra, diversificar as nossas estratégias de monitorização pode aumentar a robustez e fiabilidade da avaliação da seca em aquíferos, particularmente em regiões costeiras, e ajudar a conceber melhores estratégias de gestão da seca.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) I.P./MCTES através de fundos nacionais (PIDDAC) – UIDB/ 50019/2020 (<https://doi.org/10.54499/UIDB/50019/2020>), UIDP/50019/2020 (<https://doi.org/10.54499/UIDP/50019/2020>) e LA/P/0068/2020 (<https://doi.org/10.54499/LA/P/0068/2020>).

REFERÊNCIAS

- [1] Bloomfield, J.P. and B.P. Marchant (2013). Analysis of groundwater drought building on the standardised precipitation index approach. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 17, 4769–4787.
- [2] Kumar, R., J.L. Musuuza, A.F. Van Loon, A.J. Teuling, R. Barthel, J. Ten Broek, J. Mai, L. Samaniego, and S. Attinger (2016). Multiscale evaluation of the Standardized Precipitation Index as a groundwater drought indicator. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 20, 1117–1131.
- [3] Loucks, D.P. (1997). Quantifying trends in system sustainability. *Hydrol. Sci. J.* 42, 513–530.
- [4] Neves, M.C. (2024). Integrating standardized indices and performance indicators for better drought assessment in semi-arid coastal aquifers. *Groundwater for Sustainable Development* 27, 101341.

- [5] Neves, M.C., L. Costa, R. Hugman and J.P. Monteiro (2019). The impact of atmospheric teleconnections on the coastal aquifers of Ria Formosa (Algarve, Portugal). *Hydrogeol. J.* 27, 2775–2787.
- [6] Neves, M.C., L. Costa and J.P. Monteiro, J.P. (2016). Climatic and geologic controls on the piezometry of the Querença-Silves karst aquifer, Algarve (Portugal). *Hydrogeol. J.* 24, 1015–1028.
- [7] Peters, E., H.A.J. Van Lanen, P.J.J.F. Torfs and G. Bier (2005). Drought in groundwater - drought distribution and performance indicators. *J. Hydrol.* 306, 302–317.
- [8] SNIRH (2024) Sist. Nac. Informação Recur. Hídricos <http://www.snirh.pt>
- [9] Vicente-Serrano, S.M., S. Beguería and J.I. López-Moreno (2010). A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *J. Clim.* 23, 1696–1718.
- [10] Zeydelinejad, N., 2023. An overview of the methods for evaluating the resilience of groundwater systems. *MethodsX* 10, 102134.

Completude de linhas de água do OpenStreetMap numa região da Serra da Estrela

Completeness of OpenStreetMap Watercourses in a Region of Serra da Estrela

MONTEIRO, Elisabete ^(1,2,3); PATRÍCIO, Glória ^(1,2)

⁽¹⁾ Instituto Politécnico da Guarda, Guarda, Portugal.

⁽²⁾ TECHN&ART-Instituto Politécnico de Tomar, Center for Technology, Restoration and Enhancement of the Arts, Tomar, Portugal.

⁽³⁾ INESC Coimbra, Coimbra, Portugal.

Autor correspondente: emonteiro@ipg.pt

RESUMO

The cartographic representation of watercourses is useful for studying the hydrological processes that occur in the territory. The present study takes an approach to the variation in the completeness of water lines extracted from OpenStreetMap (OSM) in a mountainous region of Portugal (Gouveia-Guarda) in two distinct time periods relating to the years 2014 and 2023. The literature states that the completeness of OSM data in the world varies from region to region, with several studies already published that show that the completeness of some OSM themes is influenced and correlated by human presence (e.g., themes such as: roads, buildings, urban equipment, among others) and the same does not happen with watercourses. A more detailed analysis aimed to understand the possible influence of some indicators (slope, altitude and the proximity or crossing of population clusters) on the variation in the completeness of the OSM watercourses in this period. As reference data was used, the hydrography of sheet number 201 of the M888 cartographic serie of the Geospatial Information Center of the Portuguese Army at scale 1/25,000. Visual analyses were supported by satellite images of the study area. For this purpose, the Digital Elevation Model SRTM and the slope map were also generated. The results obtained show that the completeness of the watercourses in the study area has increased, however, this increase is insignificant, given the time period studied and the current possibility of creating this "feature" remotely through digitalization carried out on devices. that have easy access to satellite images.

PALAVRAS-CHAVE

Watercourses, completeness, OpenStreetMap.

INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas os dados geográficos obtidos a partir de técnicas de Detecção Remota têm sido cada vez mais utilizados para cartografar os cursos de água (Bao et al., 2021). Os processos naturais, assim como as atividades humanas que ocorrem ao longo dos tempos à superfície da Terra, são fatores que contribuem para a variação da quantidade, disponibilidade e a localização dos recursos hídricos (Jiang et al., 2014). Por outro lado, e sabendo que cerca de 80% da superfície da Terra é coberta por água, a maior parte dela existe na forma de soluções concentradas de cloreto de sódio e outros sais, sendo por isso restrita a sua utilização para múltiplos fins. Considerando todos estas condicionantes, torna-se cada vez mais importante o papel do mapeamento dos recursos hídricos para as mais variadas aplicações nomeadamente, para a realização de estudos hidrológicos que permitem efetuar a caracterização fisiográfica das bacias hidrográficas, de modo a efetuar um eficiente planeamento e gestão das mesmas.

Com a rápida evolução tecnológica verificada essencialmente no domínio das técnicas de aquisição de dados geoespaciais, o acesso a informação cartográfica deixou de estar totalmente dependente das agências cartográficas de cada país. Nos últimos anos, foram criadas plataformas e repositórios de informação geoespacial de livre acesso, das quais o OpenStreetMap (OSM) é um desses exemplos (https://wiki.openstreetmap.org/wiki/About_OpenStreetMap, acedido em 23 maio 2024). O projeto colaborativo OSM criado em 2004, usufrui da colaboração de cidadãos voluntários que em qualquer localização do mundo, criam e editam objetos do mundo real, completando cada vez mais a cobertura cartográfica de um mapa 2D do mundo que é de livre acesso. Desde então o número de colaboradores voluntários tem vindo a aumentar, atingindo no presente um valor superior a 10 000 000 de voluntários (<https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Contributors>, acedido a 23 de maio de 2024). A qualidade de

dados geoespaciais é um tópico que tem merecido crescente atenção de forma notória, por parte da comunidade científica. Um dos índices usados para analisar a qualidade de informação geoespacial é a completude (Haklay, 2010). A completude pode ser entendida como a presença ou ausência de dados e seus atributos representados num mapa ou numa base de dados geográfica, ou seja, a completude analisa os erros de omissão e de comissão. Diversos autores têm estudado a completude de dados OSM, e.g., a completude de: i) aeroportos (Chen et al., 2023), ii) edifícios (Biljecki et al., 2023); Hecht et al., 2013; Brovelli, Zamboni, 2018; Ullah et al., 2023; Herfort et al., 2023; Yeboah et al., 2021), iii) estradas (Neis et al., 2012), iv) equipamentos coletivos localizados em meio urbano (Jackson et al., 2013), v) lojas de retalho (Brückner et al., 2021) e vi) uso e cobertura do solo (Wang et al., 2020). Têm sido desenvolvidos alguns trabalhos que abordam a evolução da completude de dados OSM ao longo do tempo, e.g., redes de estradas em diversos países como Irlanda (Corcoran et al., 2013), Alemanha (Neis et al., 2011) e em cidades, nomeadamente Beijing (Zhao et al. 2015) e Ancara (Hacar et al., 2018). No entanto, encontra-se um número reduzido de publicações que analisam este indicador (completude) na aplicação a linhas de água. Este facto motivou os autores para o desenho de uma metodologia que permitisse analisar e explorar a evolução da completude de linhas de água OSM, num determinado período temporal, que neste estudo foi entre 2014 e 2023, numa dada região com características de montanha e localizada em Portugal. O estudo possibilitou ainda analisar a relação dessa evolução da completude das linhas de água OSM com alguns fatores diretamente relacionados com a morfologia do terreno, como são a altitude e o declive.

MÉTODOS E MATERIAIS

Dados e área de estudo

O estudo foi aplicado a uma região inserida na bacia hidrográfica do Rio Mondego, no município de Gouveia, Guarda (Portugal). Esta região é topograficamente caracterizada por ter relevo muito acidentado, com acentuados declives, montanhas irregulares e vales encaixados. A altitude da área de estudo varia entre 216 e 1095 metros. A Figura 1 apresenta a localização da área de estudo que corresponde à área coberta pela folha nº 201 da série cartográfica M888 do Centro de Informação Geoespacial do Exército (CIGeoE).

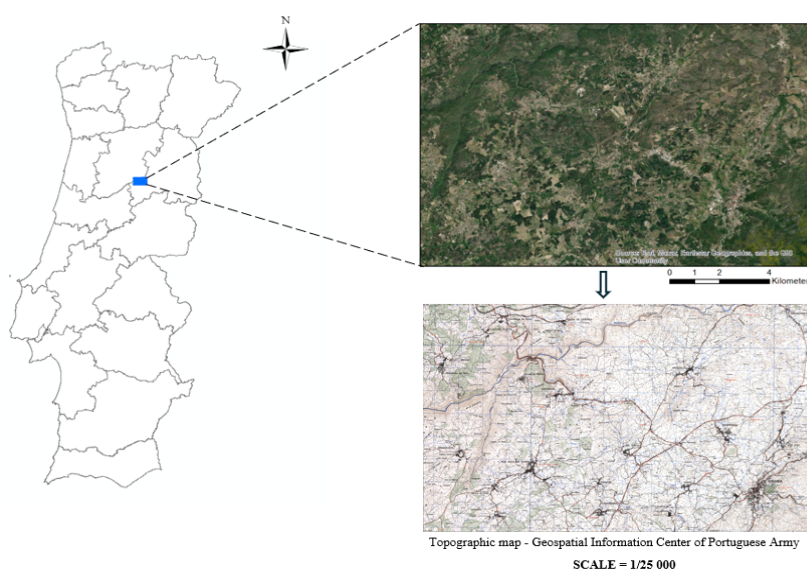


Figura 1: Localização da área de estudo e folha nº 201 da série M888 do CIGeoE.

A hidrografia da folha nº 201 da série M888 do CIGeoE à escala 1/25 000 foi utilizada como referência para a análise (Figura 2), tendo um desvio padrão na componente planimétrica de 0.97 metros (Afonso et al., 2010). Foram utilizados dados altimétricos globais Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), obtidos a partir de imagens de radar com 90 metros de resolução espacial. Estes dados estão georreferenciados no World Geodetic System 1984 (WGS 84) e as altitudes têm por base o Geodetic Reference System 1980 (GRS 80). A utilização de um Modelo Digital de Elevação SRTM de 90 metros de resolução espacial, embora sendo mais grosseira do que a resolução atualmente disponível (30 metros), teve conta o facto de os dados OSM em análise terem sido extraídos em 2014 e também a hidrografia de referência ser anterior a 2014. Para além disso, a metodologia aqui adotada para a análise da completude das linhas de água OSM, baseou-se na interpretação visual sobre imagens de satélite e a análise da relação da altitude e declive com as novas linhas de água, foi efetuada acedendo à informação associada aos pixels (altitude) respetivos.

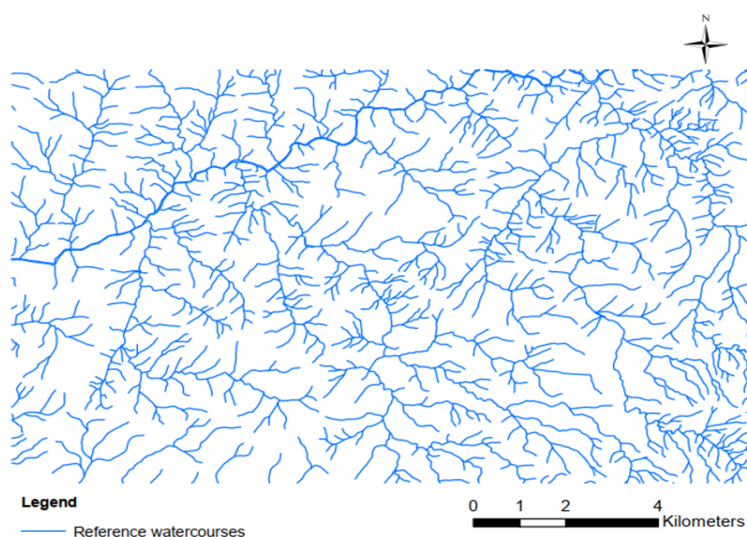


Figura 2: Hidrografia de referência da folha nº 201 da série cartográfica M888 do CIGeoE.

Metodologia

Os dados OSM (linhas de água) foram extraídos do OpenStreetMap para a área de estudo em duas datas distintas e espaçadas temporalmente de nove anos (2014 e 2023). As linhas de água OSM estavam referenciadas no World Geodetic System 1984 (WGS 84), tendo sido posteriormente projetadas para o sistema European Terrestrial Reference System 1989 (PT-TM06/ETRS 89) que era também o sistema de coordenadas associado à hidrografia do CIGeoE, usada como referência (Figura 2). A entidade geográfica OSM “waterway” está estruturada por uma key = “waterway” com os valores “river” e “stream”. A Figura 3 mostra a cobertura das linhas de água OSM extraídas em 2014 (cor laranja) e em 2023 (cor verde) para a área de estudo.

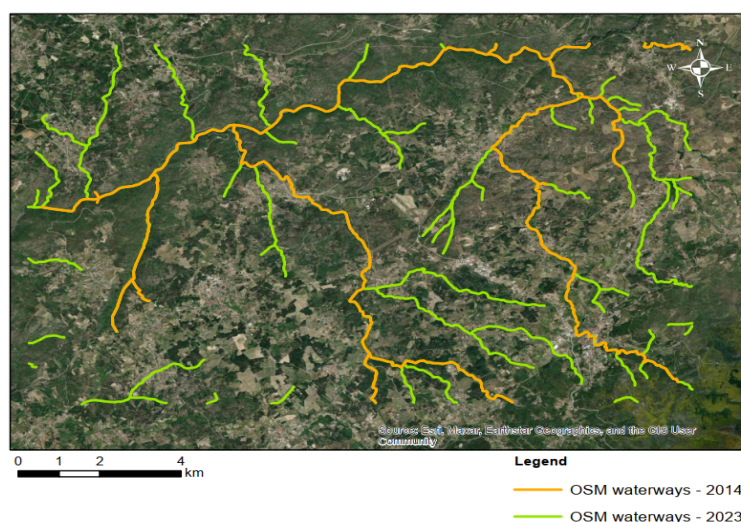


Figura 3: Linhas de água extraídas do OSM em 2014 (cor laranja) e 2023 (cor verde).

A completude de entidades geográficas representada num mapa ou base de dados geográfica é uma medida obtida a partir da sua comparação com a representação num mapa ou base de dados de referência. A completude é uma métrica ou um indicador de cobertura de entidades ou objetos geográficos representados cartograficamente (pontos, linhas e áreas ou polígonos). Neste estudo, a entidade analisada insere-se na categoria de linhas (linhas de água de uma rede hidrográfica). O método apropriado para analisar a completude de linhas é baseado na fórmula (1), onde a completude é obtida dividindo o comprimento total das linhas em análise ($L_{\text{linhas em análise}}$), pelo comprimento total das linhas de referência ($L_{\text{linhas de referência}}$), multiplicado por 100, visto que é dado sob a forma percentual.

$$Compleitude = \frac{L_{\text{Linhas em análise}}}{L_{\text{Linhas de referência}}} \times 100 \quad (1)$$

Assim, foi calculada a completude das linhas de água OSM para as duas épocas (2014 e 2023) para a área de estudo. Definiram-se aleatoriamente duas zonas (Z1 e Z2) de forma circular inseridas na área de estudo (Figura 4), tendo-se calculado a completude das linhas de água OSM para essas duas zonas, nas épocas 2014 e 2023. Os critérios usados para a definição das duas zonas de estudo foram: i) que as zonas não se intersectassem e fossem relativamente espaçadas e, ii) que se localizassem nas proximidades do rio principal (Rio Mondego). Claro que esta análise em regiões inseridas na área de estudo global, pretendeu analisar alguma possível variabilidade espacial na evolução da completude das linhas de água OSM.

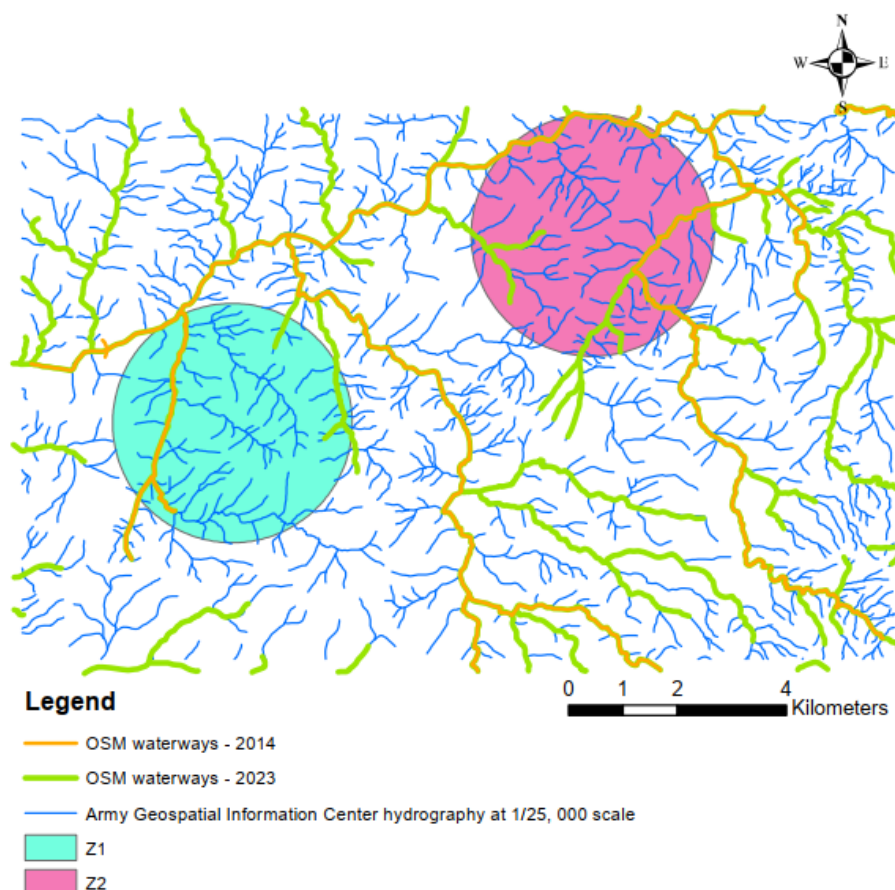


Figura 4: Zonas circulares (Z1 e Z2) definidas na área de estudo, sobrepostas à rede hidrográfica de referência (a cor azul) e linhas de água OSM extraídas em 2014 (a cor laranja) e em 2023 (a cor verde).

De forma a entender uma possível relação entre o aparecimento de novas linhas de água OSM com a altitude do terreno, foi extraído o Modelo Digital de Elevação Global (MDEG) SRTM, com dados estruturados em formato raster e de seguida, recorrendo à interpretação visual realizada sobre imagem de satélite embebida em ambiente de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), foi feita essa análise. A partir do MDE, foi gerado o mapa de declive, tendo sido comparado com a localização das novas linhas de água OSM.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Pela análise das linhas de água OSM em toda a área de estudo e nas duas épocas consideradas, pode verificar-se que, e de acordo com a Tabela 1, há um aumento de completude de 15.4%. Também se pode observar que, o aumento do número de “rivers” verificado (de 7 para 9) foi menor que o verificado para o número de “streams” (de 8 para 72).

Tabela 1: Comprimento total das linhas de água OSM, completude, número de “rivers” e número de “streams” em toda a área de estudo.

Linhas de água OSM	Comprimento total (m)	Compleitude (%)	Nº rivers	Nº streams
Referência	555 635			
OSM-2014	60 183	10.8	7	8
OSM-2023	145 303	26.2	9	72

A partir do MDEG SRTM gerado para a área de estudo, analisou-se a localização das novas linhas de água OSM em relação à altitude do terreno. A Figura 5 apresenta as linhas de água OSM extraídas em 2014 e em 2023 sobrepostas ao MDEG SRTM gerado. Como já foi referido, a área de estudo insere-se na serra mais elevada de Portugal (Serra da Estrela), tendo uma altitude média de 655,5 metros. Quando se observam as novas linhas de água OSM (OSM-2023), algumas delas aparecem localizadas em regiões de baixa altitude, com valores que variam entre 250 e 500 metros. Estas regiões localizam-se junto ao rio principal (Rio Mondego), mas aparecem também novas linhas de água OSM nas regiões mais elevadas com valores de altitude que variam entre 800 e 1095 metros (na parte sudeste da área de estudo e afastadas do rio principal). Estes resultados permitem dizer que o atributo altitude aparentemente, não teve influência na criação de novas linhas de água OSM pelos voluntários. Tal poderá ser explicado pelo facto da comunidade de cidadãos voluntários OSM, criarem linhas de água recorrendo a processos de vectorização sobre imagens de satélite, operações estas fortemente dependentes de uma boa e correta interpretação visual.

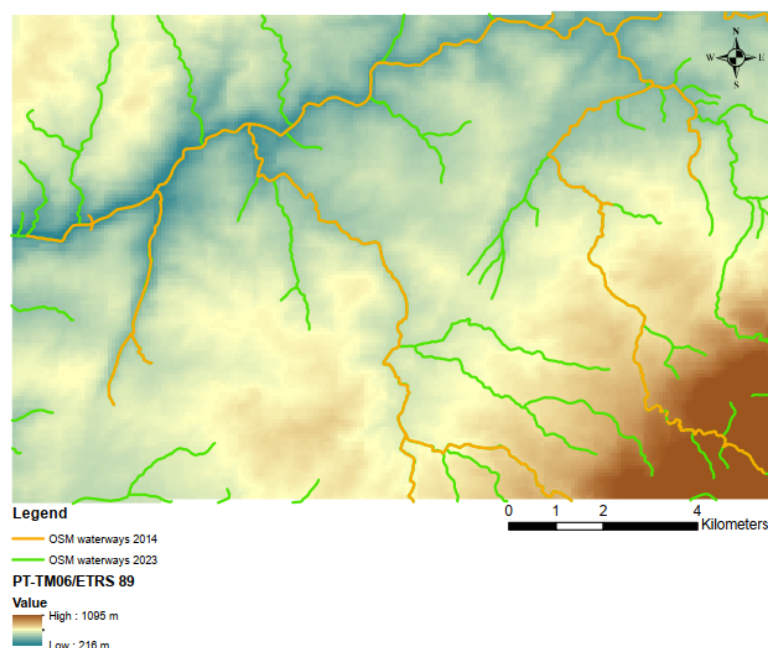


Figura 5: MDEG SRTM da área de estudo com a localização das linhas de água OSM referentes às duas épocas (2014 e 2023).

Por vezes, nas zonas de maior altitude, a definição de linhas de água OSM recorrendo a imagens de satélite é mais fácil de entender, pois, o próprio relevo aí existente modela a estrutura da rede hidrográfica. Também acontece que, nas zonas de menor altitude e de relevo suave, onde existe vegetação envolvente às linhas de água, sendo esta bem visível nas imagens de satélite, permite uma mais fácil identificação. Já a definição das linhas de água de referência, obtidas por processos fotogramétricos recorrendo a processos de estereorrestituição visual, em zonas de menor relevo, poderá tornar-se mais difícil.

O declive é um indicador fortemente relacionado com a variação da altitude ao longo do terreno, assim tentou-se perceber se a localização das novas linhas de água OSM estariam ou não correlacionadas com o declive. Para tal, recorrendo ao MDEG SRTM foi gerado um mapa de declive utilizando nove (9) classes de declive (Figura 6). Analisando o mapa de declive gerado, verifica-se que as zonas mais declivosas se localizam em torno do rio principal (Rio Mondego) e também na parte sudeste da área de estudo. As novas linhas de água OSM aparecem em maior quantidade nas 4 primeiras classes de declive (%): [0-2.5], [2.6-4.4], [4.5-6.5], e [6.6-8.9]. Todavia, também se observam novas linhas de água OSM em zonas de declive acentuado, localizadas na parte sudeste da área de estudo, como já foi mencionado anteriormente, com declives (%): [11.7-14.6], [14.7-18.4], [18.5-23.1], e [23.2-32.4].

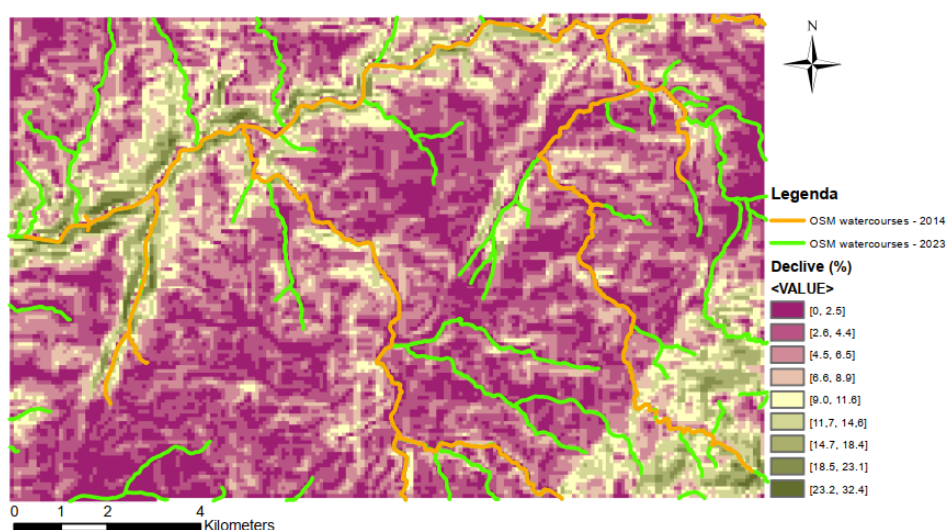


Figura 6: Mapa de declive da área de estudo, gerado a partir de nove classes de declive e as linhas de água extraídas em 2014 (a cor laranja) e em 2023 (a cor verde) do OpenStreetMap.

Os resultados mostram que o declive não teve influência na criação de novas linhas de água OSM, o que parece natural, pois, nas operações de digitalização efetuadas pelos voluntários do OpenStreetMap sobre imagens de satélite, não existe a percepção evidente e direta do declive como existe numa carta topográfica onde, a representação altimétrica do terreno através de pontos cotados e curvas de nível é evidente, permitindo uma correta e direta interpretação. Apesar de, como já foi referido, existirem zonas onde a própria vegetação envolvente ao rio (ou linha de água) permite uma boa definição, também há que ter em consideração que nas imagens de satélite existem variações na resolução espacial e temporal, o que pode tornar o processo de digitalização mais difícil, particularmente em zonas de declive mais suave.

De seguida, analisou-se a completude das linhas de água OSM nas épocas 2014 e 2023 nas zonas circulares (Z1 e Z2), aleatoriamente definidas e inseridas na área de estudo, tendo-se obtido resultados um pouco diferentes dos que se obtiveram para a área de estudo. A Tabela 2 apresenta o comprimento total, a completude, o número de “rivers” e o número de “streams” nas duas épocas para a zona Z1.

Tabela 2: Comprimento total das linhas de água OSM, completude, número de “rivers” e número de “streams” para a zona Z1.

Linhas de água OSM	Comprimento total (m)	Completude (%)	Nº rivers	Nº streams
Referência	64 414			
OSM-2014	8 904	13.8	1	2
OSM-2023	13 974	21.7	1	5

Os resultados da Tabela 2 mostram um aumento da completude de 7.9%, sendo este um valor mais baixo do que o obtido para toda a área de estudo (15.4%). Em relação ao número de “rivers”, não se verificou alteração, mas o número de “streams” aumentou de 2 para 5. Na Tabela 3 pode ver-se que, na zona Z2 o aumento da completude foi de 13.6%, um valor maior que o obtido para a zona Z1, mas ainda assim inferior ao valor atingido para toda a área de estudo (15.4%). O número de “rivers” aumentou de 1 para 3 e o número de “streams” aumentou de 2 para 6. Também se pode observar que, o comprimento total das linhas de água de referência da zona Z2 (69 784 metros) é maior que o comprimento total das linhas de água de referência da zona Z1 (64 414 metros), o que permite dizer que o aumento de completude nas duas zonas evoluiu no sentido dos dados de referência, pois, na zona Z2 existem mais linhas de água. De seguida, apresenta-se a Tabela 3 referente aos resultados para a zona Z2.

Tabela 3: Comprimento total das linhas de água OSM, completude, número de “rivers” e número de “streams” para a zona Z2.

Linhas de água OSM	Comprimento total (m)	Completude (%)	Nº rivers	Nº streams
Referência	69 784			
OSM-2014	12 527	18.0	1	2
OSM-2023	22 037	31.6	3	6

As Figuras 7 e 8 mostram as linhas de água de referência e as linhas de água OSM nas duas épocas estudadas (2014 e 2023) para as duas zonas, Z1 e Z2, respetivamente.

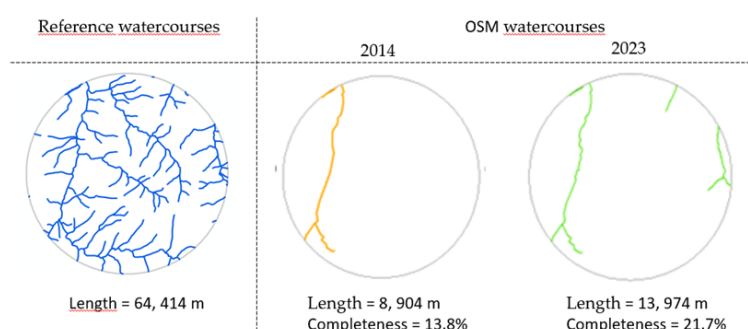


Figura 7: Linhas de água de referência e linhas de água OSM extraídas em 2014 e 2023 para a zona Z1.

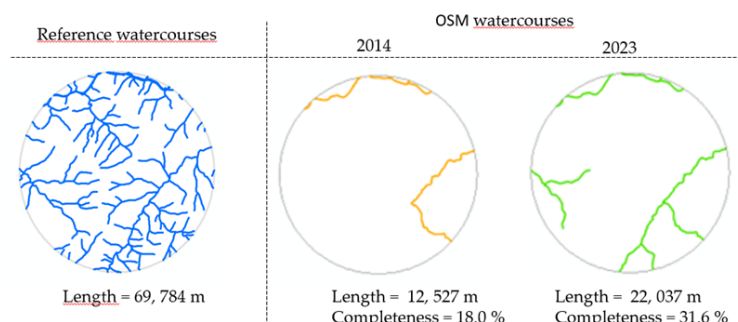


Figura 8: Linhas de água de referência e linhas de água OSM extraídas em 2014 e 2023 para a zona Z2.

Considerando o MDEG SRTM para a zona Z1, verifica-se que as novas linhas de água OSM estão representadas em regiões com valores de elevação compreendidos no intervalo [385 m, 461 m]. Já na zona Z2, as novas linhas de água OSM localizam-se em regiões com altitudes de [357 m, 376 m], [371 m, 418 m] e [358 m, 407 m]. A análise do declive para as zonas Z1 e Z2 foi também realizada tendo-se verificado que, as novas linhas de água OSM na zona Z1, aparecem em classes de declive (%): [0.0-2.4]; [5.8-7.7] e [7.8-9.9], enquanto na zona Z2, as novas linhas de água OSM aparecem em classes de declive (%): [0.0-2.4]; [2.5-4.0] e [7.8-9.9].

CONCLUSÕES

A evolução da completude das linhas de água do OpenStreetMap foi analisada para uma região de montanha inserida na bacia hidrográfica do Rio Mondego, na região de Gouveia, Guarda, num período compreendido entre 2014 e 2023. Os resultados obtidos mostram que houve um aumento da completude das linhas de água OSM de 15.4% para toda a área de estudo. Considera-se ser um valor baixo no aumento da completude, tendo em consideração a amplitude temporal decorrida (nove anos). Para além disso, sabendo que este tipo de entidades geográficas OSM (OSM waterway) podem ser criadas recorrendo a dispositivos móveis com acesso a imagens de satélite de alta resolução espacial, que a maior parte dos cidadãos possui, podendo por isso, ser criada remotamente na plataforma OSM. Considera-se que estes resultados são importantes, na medida em que na literatura da especialidade, a completude de dados OSM de outras entidades já foi analisada por diversos autores, no entanto, a completude das linhas de água OSM é um tópico que tem sido pouco abordado. Para além disso, as análises de completude de

dados OSM publicadas localizam-se na maioria em meio urbano, devido também às características das próprias entidades analisadas (estradas, edifícios, entre outros). As entidades “linhas de água” são componentes das redes hidrográficas e revestem-se de especificidades, tais como, o facto de serem entidades lineares que se estendem por distâncias consideráveis de um território e são bem interpretáveis nas imagens de satélite, meio habitualmente utilizado pelos colaboradores voluntários da plataforma OSM, para a criação/digitalização de dados geoespaciais.

Um dos objetivos foi perceber se existiria alguma relação entre o aparecimento de novas linhas de água OSM com a altitude e o declive do terreno. Devido à especificidade da entidade geográfica (OSM waterway), tentou-se analisar a possível influência da localização de novas linhas de água OSM com a altitude e o declive. Observando a localização de novas linhas de água OSM, verifica-se que tanto se localizam nas zonas mais baixas como nas zonas mais elevadas, pelo que se julga não existir influência entre a altitude e a localização das novas linhas de água OSM. Tais resultados poderão ser justificados pelo facto de na área de estudo existirem extensos afloramentos rochosos, o que poderá dificultar a identificação das linhas de água na imagem de satélite aquando da operação de digitalização/vectorização das mesmas, ou seja, surge aqui um outro atributo para possível estudo num trabalho futuro, que seria a influência do indicador cobertura do solo na evolução da completude das linhas de água OSM num determinado período temporal. Em relação aos resultados obtidos para o atributo declive, não se verifica uma relação entre o aparecimento de novas linhas de água OSM e o parâmetro declive, pois algumas linhas de água OSM extraídas em 2023 localizam-se em zonas pouco declivosas, enquanto outras estão representadas em zonas acentuadamente declivosas. Para se obterem análises com resultados mais concretos, o que levaria a perceber as tendências, seria aplicar a metodologia proposta a outras áreas de estudo, e com características semelhantes (regiões rurais e de relevo semelhante) e analisar a evolução da completude das linhas de água OSM extraídas nesses dois anos que foram os considerados neste estudo (2014 e 2023).

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Centro de Informação Geoespacial do Exército (CIGeoE) pela cedência dos dados hidrográficos (Hidrografia da série cartográfica M888), utilizados como referência no presente estudo.

REFERÊNCIAS

- [1] Bao, L., Ly, X. Yao, L., (2021): " Water Extraction in SAR Images Using Features Analysis and Dual-Threshold Graph Cut Model". Remote Sensing, 13, 3465.
- [2] Jiang, H., Feng, M., Zhu, Y., Lu, N., Huang, J., Xiao, T. (2014): "An Automated Method for Extracting Rivers and Lakes from Landsat Imagery". Remote Sens. 6, 5067–5089.
- [3] Haklay, M. (2010). How Good is Volunteered Geographical Information? "A Comparative Study of OpenStreetMap and Ordnance Survey Datasets". Environment and Planning B: Planning and Design, 37(4), 682-703. <https://doi.org/10.1068/b35097>
- [4] Chen, Y., Wei, Z. e Zhou, Q. (2023): "Assessing completeness of global airport data in OSM". Advances in Cartography and GIScience of the International Cartographic Association. In Proceedings of the 31st International Cartographic Conference, 13–18.
- [5] Biljecki, F., Chow, Y.S., Lee, K. (2023): "Quality of crowdsourced geospatial building information: A global assessment of OpenStreetMap attributes". Build. Environ., 237, 110295.
- [6] Hecht, R., Kunze, C., Hahmann, S. (2013): "Measuring Completeness of Building Footprints in OpenStreetMap over Space and Time". ISPRS Int. J. Geo-Inf., 2, 1066–1091.
- [7] Brovelli, M.A., Zamboni, G.A. (2018): "New Method for the Assessment of Spatial Accuracy and Completeness of OpenStreetMap Building Footprints". ISPRS Int. J. Geo-Inf., 7, 289.
- [8] Ullah, T., Lautenbach, S., Herfort, B., Reinmuth, M., Schorlemmer, D. (2023): "Assessing Completeness of OpenStreetMap Building Footprints Using MapSwipe". Int. J. Geoinf., 12, 143.
- [9] Herfort, B., Lautenbach, A., Albuquerque, J.P., Anderson, J., Zipf, A. (2023): A spatio-temporal analysis investigating completeness and inequalities of global urban building data in OpenStreetMap". Nat. Commun, 14, 3985.
- [10] Yeboah, G., Porto de Albuquerque, J., Troilo, R., Tregonning, G., Perera, S., Ahmed, S.A.K.S., Ajisola, M., Alam, O., Aujla, N.,

- Azam, S.I., et al. (2021): "Analysis of OpenStreetMap Data Quality at Different Stages of a Participatory Mapping Process: Evidence from Slums in Africa and Asia". *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* 10, 265.
- [11] Neis, P., Zielstra, D., Zipf, A. (2012): "The Street Network Evolution of Crowdsourced Maps: OpenStreetMap in Germany 2007–2011". *Future Internet*, 4, 1–21.
- [12] Jackson, S.P., Mullen, W., Agouris, P., Crooks, A., Croitoru, A., Stefanidis, A. (2013): "Assessing Completeness and Spatial Error of Features in Volunteered Geographic Information". *ISPRS–Int. J. Geo-Inf.*, 2, 507–530.
- [13] Brückner, J., Schott, M., Zipf, A., Lautenbach, S. (2021): "Assessing shop completeness in OpenStreetMap for two federal states in Germany". *AGILE GIScience Ser.*, 2, 20.
- [14] Wang, S., Zhou, Q., Tian, Y. (2020): "Understanding Completeness and Diversity Patterns of OSM-Based Land-Use and Land Cover Dataset in China". *ISPRS–Int. J. Geo-Inf.*, 9, 531.
- [15] Corcoran P., Mooney P., Bertolotto M. (2013): "Analysing the growth of OpenStreetMap networks". *Spatial Statistics*, Elsevier; 3, 21–32.
- [16] Zhao P., Jia T., Qin K., Shan J., Jiao C. (2015): "Statistical analysis on the evolution of OpenStreetMap road networks in Beijing". *Physica A: Stat Mech Appl.*, Elsevier, 420, 59–72.
- [17] Hacı M., Kılıç B., Şahbaz K. (2018): "Analyzing OpenStreetMap Road Data and Characterizing the Behaviour of Contributors in Ankara, Turkey". *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* 7(10), 400.
- [18] Afonso, A.; Lopes, J.; Dias, R. (2010): "Controlo de Qualidade Posicional da Cartografia Militar do IGeoE em ETRS89". Report of IGeoE. 5p. Available online: http://www.igeoe.pt/downloads/file2_pt.pdf (accessed on 30 May 2024).

S.08

Geofísica Aplicada

Geofísica Aplicada

Estudio geofísico del deslizamiento de Albuñuelas (sureste de España) mediante el uso de medidas de ruido ambiente

Geophysical study of the Albuñuelas landslide (S Spain) using ambient noise measurements

MITA, Mara⁽¹⁾; GALIANA-MERINO, Juan José^(2,3); GARRIDO, Jesús⁽⁴⁾; LENTI, Luca⁽⁵⁾; MARTINO, Salvatore⁽⁶⁾; PAPPADOPOULOU, Jacopo⁽⁷⁾; PELÁEZ, José A.⁽⁸⁾; BENABDELOUED, Boualem Youcef Nassim^(3,9); DELGADO, José⁽⁹⁾

⁽¹⁾ Dpt. Géotechnique, Environment, Risques Naturels et Sciences de la Terre, Université Gustave Eiffel, France.

⁽²⁾ University Institute of Physics Applied to Sciences and Technologies, University of Alicante, Spain.

⁽³⁾ Dpt. of Physics, Systems Engineering and Signal Theory, University of Alicante, Spain

⁽⁴⁾ Dpt. Civil Engineering, University of Granada, Granada, Spain.

⁽⁵⁾ D Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux (IFSTTAR), France.

⁽⁶⁾ Dpt. Earth Science and Research Centre for Geological Risk (CERI), Università di Roma "La Sapienza", Italy.

⁽⁷⁾ Geo2Siena, Siena, Italy.

⁽⁸⁾ Dpt. Physics, University of Jaén, Jaén, Spain.

⁽⁹⁾ Dpt. Earth Sciences and Environment, University of Alicante, Alicante, Spain.

Autor correspondiente: mara-mita@univ-eiffel.fr

SUMMARY

Landslides are common soil effects that can be induced as an effect of an earthquake. In the case of large landslides, their effects can be quite dangerous for nearby populations. This is the case of the urban area of Albuñuelas (Granada, S Spain), developed on a large landslide characterized by very low rate of movement. These effects are clearly observed in multiple houses, which have suffered visible rotations of their structure. Despite this, the internal structure of this landslide, and how it has evolved to its current state is unknown. In the case of large landslides, such as this one, the use of boreholes may be prohibitive from an economic point of view. In this work, other techniques based on seismic noise analysis (H/V measurements and array measurements) have been chosen to define for the first time the structure and characteristics of the landslide under study. The inversion of both the H/V curves and the dispersion curves (obtained from array measurements using the frequency - wavenumber method) has allowed us to estimate the soil stratigraphy at each measurement site. Additionally, information from a borehole carried out in this area and field observations of the local geology have been used to reduce uncertainties in the results. From these data, a geological-geophysical model of the landslide has been built, demonstrating that the thickness of the landslide is greater than 50 m in its central parts and greater than 60 m in the upper parts. This model shows that the evolution of the landslide was complex, with several bodies moving in sequence (retrogression) and being partially eroded at the toe to explain the current morphology of the landslide.

PALABRAS CLAVE

Landslide, geological structure, geophysical prospecting, array techniques, ambient noise.

INTRODUCCIÓN

La localidad de Albuñuelas (provincia de Granada) está situada cerca del límite sur de la cuenca de Granada y fue construida sobre un deslizamiento, que se caracteriza por un ritmo de movimiento muy bajo (Chacón et al., 1997). Este pueblo fue destruido durante el terremoto de Andalucía (24/12/1884), Mw 6,5 (IGN, 1980), siendo las casas más antiguas del pueblo las reconstruidas después del terremoto (Figura 1). Actualmente, estas casas más antiguas han perdido la verticalidad, presentando rotaciones de hasta 6 grados. Inicialmente se interpretó que esto se debía al desplazamiento acumulado por deslizamientos de tierra después de la reconstrucción de la ciudad (Chacón et al., 1997). Sin embargo, los datos de la medición sistemática de la inclinación de las casas (Chacón et al., 2007) y de la interferometría SAR (Fernández et al., 2009) parecen señalar que un patrón complejo de asentamiento progresivo del suelo también puede explicar la inclinación observada. A pesar de la amenaza que el movimiento de este deslizamiento de tierra puede representar para esta ciudad, la geometría y estructura del deslizamiento siguen siendo desconocidas. Esta información resulta crucial para evaluar el peligro que un aumento en la velocidad del deslizamiento podría representar para este municipio.

En general, la morfología y la ubicación de la superficie de rotura son datos básicos necesarios para evaluar cómo la estabilidad de un determinado deslizamiento de tierra puede evolucionar debido a diferentes cambios de factores desencadenantes (Cruden y Varnes, 1996; Duncan y Wright, 2005). Estos datos se han recopilado normalmente mediante la perforación de costosos sondeos. Aunque este procedimiento es muy eficaz y permite recuperar muestras intactas, que pueden probarse en laboratorio para estimar las propiedades geotécnicas de los materiales afectados por la inestabilidad, puede resultar prohibitivo cuando la masa del deslizamiento es muy grande, porque el número de perforaciones necesarias es demasiado alto. Para estos casos, los métodos geofísicos representan una solución interesante porque permiten cubrir rápidamente amplias áreas a un coste razonable y no perturban el área en estudio (Jongmans y Garambois, 2007; Rogers y Chung, 2017; Pazzi et al., 2019), siendo esta última característica interesante cuando los deslizamientos afectan a áreas urbanas. En la actualidad, los métodos electromagnéticos (Méric et al., 2005; Reyes-Carmona et al., 2021), eléctricos (Perrone et al., 2004; Szalai et al., 2017) y sísmicos (Méric et al., 2007; Imposa et al., 2017; Del Gaudio et al., 2021) se encuentran entre las técnicas geofísicas más utilizadas para el estudio de deslizamientos de tierra.

En el caso de los métodos sísmicos, en los últimos tiempos han ganado popularidad aquellos basados en el análisis espectral del ruido ambiente (métodos pasivos) (Perrone et al., 2004; Méric et al., 2005; Szalai et al., 2017; Méric et al., 2017; Imposa et al., 2017; Pazzi et al., 2019; Reyes-Carmona et al., 2021; Del Gaudio et al., 2021; Delgado et al., 2021). La base de estas técnicas es encontrar el contraste de propiedades mecánicas entre un basamento profundo y rígido, y una capa (o múltiples capas) de material más blando que descansa sobre este basamento. El estudio puede realizarse a través de estaciones individuales equipadas con sensores triaxiales (técnica HVSR) (Nakamura, 1989) o mediante conjuntos de sensores verticales analizados utilizando el método de autocorrelación espacial (SPAC) (Aki, 1957), el análisis de autocorrelación espacial extendida (ESAC) (Otori et al., 2002; Okada, 2003) o la transformada frecuencia-número de onda (f-k) (Capon, 1969; Lacoss et al., 1969), entre otros métodos posibles. El método HVSR proporciona la frecuencia de resonancia o fundamental de las ondas SH (por ejemplo, Bonnefoy-Claudet et al., 2008), mientras que las curvas de dispersión de ondas superficiales resultan del análisis de los datos en array (por ejemplo, Capon, 1969; Lacoss et al., 1969; Okada, 2003; Parolai et al., 2007; Bonnefoy-Claudet et al., 2008; Endrun et al., 2010). Ambos tipos de resultados se pueden invertir, proporcionando una columna de suelo que representa la estratigrafía local, donde cada capa se caracteriza por su espesor y velocidad de onda de cizalla (Parolai et al., 2005; Picozzi et al., 2005).

En este trabajo presentamos el diseño, desarrollo y resultados del estudio geofísico realizado sobre el deslizamiento de Albuñuelas. Para este propósito, se han utilizado varias técnicas geofísicas basadas en medidas de ruido ambiente y los resultados han estado restringidos por datos adicionales de campo (estructurales y geomorfológicos), así como por datos provenientes de un sondeo perforado específicamente para este estudio. El objetivo principal ha consistido en la aplicación de diferentes métodos sísmicos pasivos conocidos para estimar la extensión y profundidad del deslizamiento con el fin de construir un modelo que pueda contribuir a comprender el comportamiento de este deslizamiento. Esto permitirá futuros estudios sobre su comportamiento debido a diferentes factores desencadenantes (escenarios de lluvias intensas, socavación de ríos o sacudidas sísmicas severas).

ADQUISICIÓN DE DATOS Y ANÁLISIS

Para el presente estudio se llevó a cabo específicamente un sondeo realizado por el laboratorio Centro de Geotecnia y Control de Obras S.L. La perforación alcanzó los 48 m de profundidad y se detuvo debido a limitaciones de los fondos disponibles.

Del estudio geotécnico se pueden extraer las siguientes conclusiones: a) existe una capa poco profunda de rellenos antrópicos de 1,0 m de espesor; b) bajo ella hay una capa de 9,6 m de limos y conglomerados arcillosos de color marrón a rojo, c) a 10,6 m de profundidad, areniscas y arenas arcillosas de color amarillo, poco cementadas; y d) debajo de estos materiales, la columna de suelo está compuesta por arcillas grises (3,5 m) y limos rojos (28 m), incluyendo niveles de areniscas y conglomerados. Estos conglomerados se vuelven más frecuentes hacia el final del pozo. Desafortunadamente, la perforación se detuvo antes de llegar a la base de sedimentos rojos y al basamento de la cuenca.

Posteriormente se tomaron medidas de ruido ambiente en 26 sitios diferentes del área bajo estudio. La ubicación de estos sitios se seleccionó con el fin de obtener información a lo largo de los cortes transversales del deslizamiento principal donde se ubica la población y considerando la distribución de las diversas partes que constituyen el deslizamiento. También se realizaron otras medidas a lo largo de las partes superiores de la pendiente, fuera del deslizamiento, para obtener información sobre la distribución (espesor) de los materiales en las áreas estables.

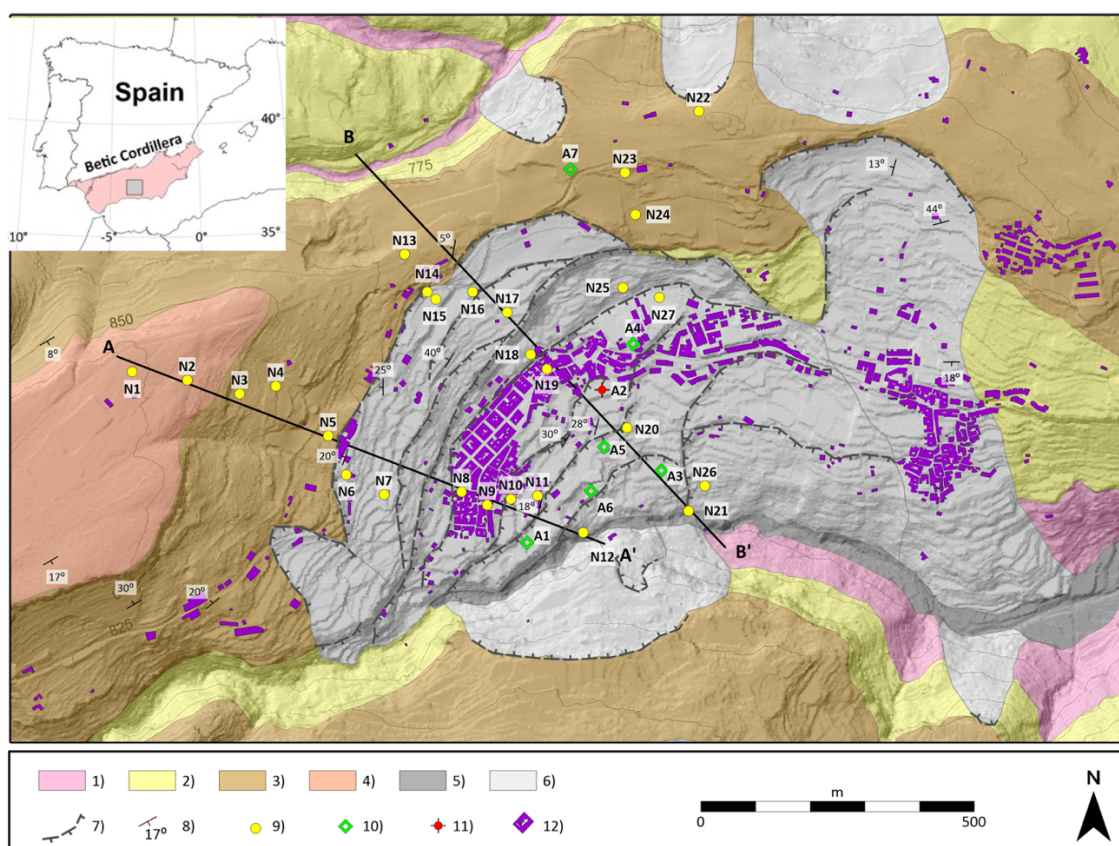


Figura 1: Mapa geológico de la zona de Albuñuelas mostrando la ubicación de los lugares de medición. 1) Limos rojos (serravalenses); 2) areniscas arrecifales y calcarenitas (Tortoniano Inferior); 3) conglomerados y limos de color rojo anaranjado (Tortoniano superior); 4) conglomerados (Plioceno-Cuaternario); 5) sedimentos aluviales (Cuaternario); 6) deslizamientos (Cuaternario); 7) escarpe de deslizamientos de tierra; 8) dirección y buzamiento de las capas; 9) mediciones de estación única (HVSr); 10) mediciones de array; 11) pozo perforado + HVSr + Array; 12) bloques de casas.

Las medidas se realizaron con estaciones de banda ancha Guralp CMG-6TD. La duración de los registros fue de aproximadamente 60 minutos, tiempo suficiente para garantizar la estabilización estadística de la señal. La frecuencia de muestreo se configuró en 100 Hz y los datos se guardaron en formato Guralp Compress (GCF). Se utilizó el software Geopsy para el análisis H/V de los datos.

También se han implementado arrays 2D en siete sitios diferentes a lo largo del deslizamiento. Las medidas obtenidas en estos arrays han sido analizadas mediante la técnica f-k (Jongmans y Garambois, 2007), proporcionando una estimación de la curva de dispersión de velocidad de fase de la onda Rayleigh. El equipo utilizado consistió en doce geófonos verticales de 4,5 Hz conectados a un registrador sísmico multicanal (SmartSeis ST), lo que permite recuperar curvas de dispersión por encima de aproximadamente 2 Hz (Galiana-Merino et al., 2011; Rosa-Cintas et al., 2012). Los geófonos se desplegaron siguiendo una disposición circular o rectangular con una apertura máxima de 16-20 m, dependiendo del espacio disponible. Considerando que las longitudes de onda estimadas por el método f-k pueden ser varias veces mayores que la apertura máxima (Asten y Henstridge, 1984; Arai y Tokimasu, 2004), estas configuraciones serían suficientes para propósitos de clasificación de suelos (Council, 2009). La duración de los registros fue de 30-45 minutos, con una frecuencia de muestreo de 500 Hz, aunque posteriormente se volvió a muestrear a 100 Hz.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La información proporcionada por el sondeo se ha utilizado como punto de partida para la estimación del perfil Vs en el centro del deslizamiento. Según la estratigrafía del lugar, se pueden considerar principalmente tres estratos diferentes de materiales: limos y conglomerados, areniscas y limos rojos. Además, también se observa una capa superficial de alteración y/o rellenos antrópicos.

Inicialmente se realizaron medidas de ruido sísmico en el mismo sitio del sondeo con el fin de combinar el análisis H/V y en array con la información geotécnica y evaluar la fiabilidad de los resultados obtenidos (Figura 2).

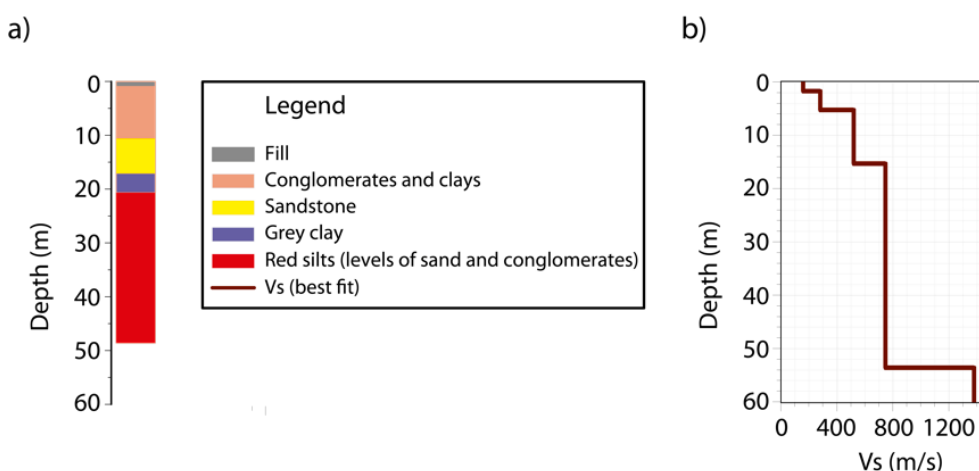


Figura 2: a) Columna estratigráfica obtenida del sondeo, b) comparación con los primeros 60 m correspondientes al modelo de menor error estimado mediante el análisis e inversión de las medidas de ruido sísmico.

Una vez obtenido este primer perfil en Vs, situado expresamente en la parte central del deslizamiento, se ha realizado el análisis del resto de sitios yendo desde los puntos más cercanos a los más alejados, situados en la cima del cerro y en la proximidad del río Saleres. De esta forma se ha tenido en cuenta la conexión entre los sitios adyacentes, obteniendo resultados coherentes del perfil Vs a lo largo del deslizamiento estudiado.

Para realizar la inversión simple (H/V) o conjunta (H/V y array) y estimar el perfil Vs correspondiente en todos los sitios seleccionados se ha utilizado el software Dinver del paquete Sesarray (Geopsy project). En algunos de los lugares, no fue posible implementar un array, por lo que solo se utilizaron medidas de H/V para el proceso de inversión.

Los resultados obtenidos de las medidas de ruido ambiente se utilizaron junto con la columna estratigráfica obtenida a partir del sondeo y con los datos geológicos (posición de los escarpes del deslizamiento, material que aflora en la superficie del suelo y dirección de buzamiento y buzamiento de los lechos en el área del deslizamiento) para modelar dos secciones transversales del deslizamiento de Albuñuelas (Figura 3). La ubicación de estas secciones se presenta en la Figura 1.

Los resultados obtenidos muestran que el límite superior de la capa de alta velocidad (base de la cuenca) dibuja una superficie que buza hacia el sur (borde derecho de las parcelas), donde se ubica la Falla de Albuñuelas, desde aproximadamente 750 m.s.n.m. en la parte norte de los tramos hasta 650 m en el lado opuesto. Además, la cubierta sedimentaria es más delgada hacia la parte sur de los cortes, alcanzando los valores más bajos en el fondo del valle, donde el basamento de la cuenca se encuentra a pocos metros bajo la superficie del suelo en el tramo B-B' (Figura 3 inferior). Esto concuerda con el mapa preparado por Avidad et al. (1981), donde probablemente sedimentos muy recientes proporcionados por el río Saleres enterraron el afloramiento cartografiado por estos autores. En las partes superiores del talud, las unidades sedimentarias también buzan hacia el sur con excepción de la sección B-B', donde existe un amplio sinclinal en la parte superior del área.

Los resultados muestran que los espesores tanto de las unidades de areniscas (areniscas arrecifales y calcarenitas) como de limos rojos son muy variables en la zona del deslizamiento, con sucesivas reducciones y aumentos de espesor. Como se explicó anteriormente, esto se interpreta como el efecto de múltiples superficies de falla que cortan estas unidades geológicas, causando los cambios de espesor estimados. Debido a que la unidad de limos rojos también se ve afectada, se deduce que la superficie de rotura basal del deslizamiento debe encontrarse en la base de esta unidad y las superficies de rotura intermedias se enraízan en esta superficie (Figura 3). En algunos casos, donde el basamento es más profundo, la rotura basal ocurre dentro de la unidad de limos rojos (Sección A-A'). Esta superficie se encuentra a más de 60 m de profundidad en la parte superior del deslizamiento y a unos 50 m en su sección media.

El modelo propuesto obtenido después de la integración de todos los datos disponibles muestra una ladera afectada por un deslizamiento rotacional organizado en varios bloques (Figura 3). El movimiento (rotación) de los bloques es mayor hacia la base

del deslizamiento, lo que puede interpretarse como debido a una mayor antigüedad, y el deslizamiento ha sido de tipo retrogresivo. La inestabilidad inicialmente afectó las partes inferiores del talud y a medida que avanzaba el movimiento, las partes superiores del talud se volvieron inestables, aumentando el tamaño del conjunto. Los bloques superiores presentan el desplazamiento menor y su efecto sobre la topografía se reduce.

Los resultados obtenidos y las secciones transversales obtenidas muestran la importancia de dos factores en la ocurrencia de este deslizamiento de tierra. Primero, el valle sufrió en el pasado un intenso proceso de erosión, donde la incisión del río provocó la erosión de la mayor parte del relleno sedimentario. Esta excavación de las laderas del valle contribuyó a una desestabilización inicial de las mismas. Además, el buzamiento general de las capas hacia la cara libre del talud también contribuyó a la ruptura general del talud del valle. En los tramos propuestos, la erosión ha eliminado el relleno sedimentario en el tramo B-B' (Figura 3), pero aún quedan restos de este relleno en el tramo A-A'. Es razonable esperar que el río continúe su incisión (<1 mm/año), más efectiva en los limos rojos (sección A-A') que en los mármoles y esquistos encontrados en la sección B-B' (Figura 3), por lo que es previsible que la evolución futura de este deslizamiento sea más pronunciada en su flanco occidental.

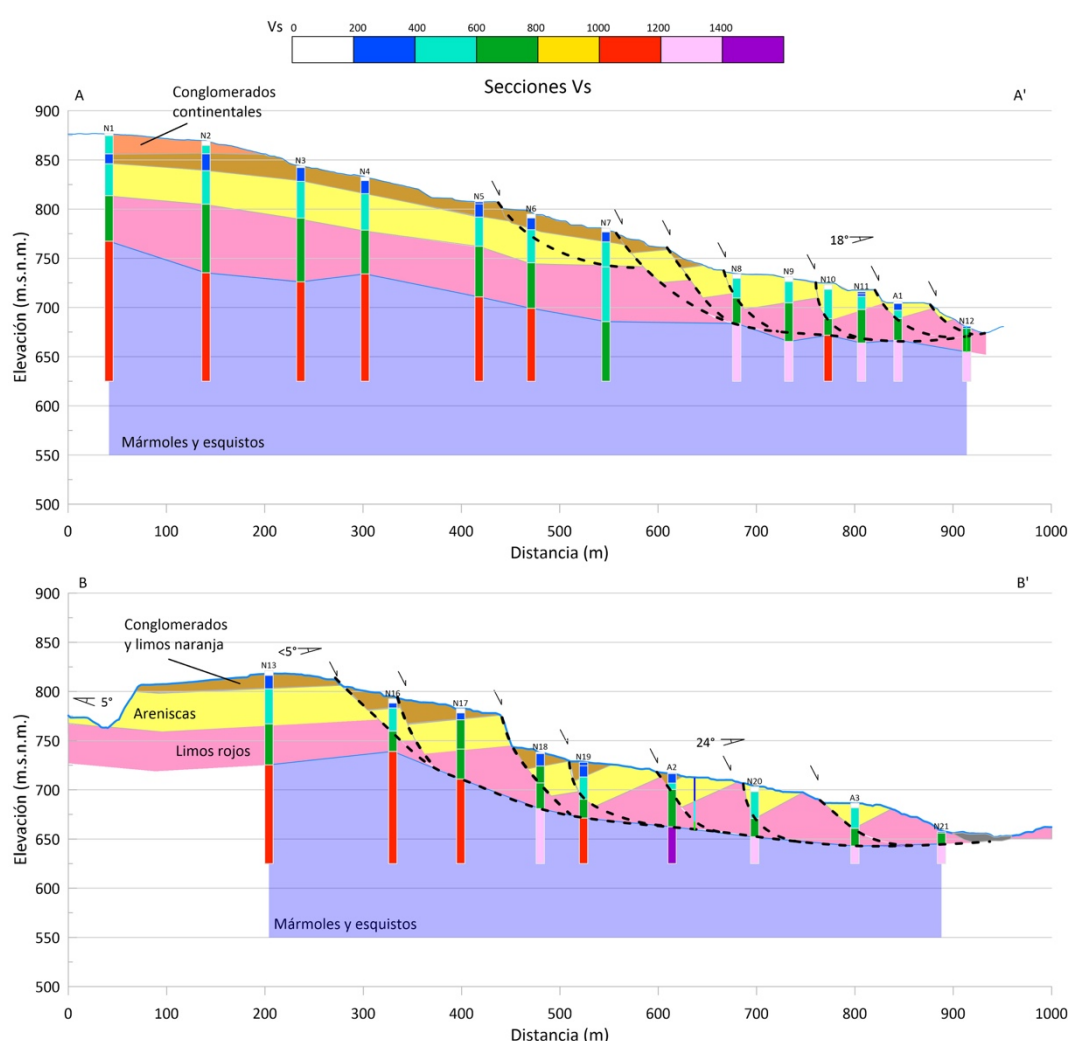


Figura 3: Secciones longitudinales del deslizamiento de Albuñuelas que muestran la posición estimada de los sucesivos cortes que constituyen el desprendimiento. El gráfico muestra caídas aparentes utilizadas para construir el modelo. El gráfico limita la profundidad de la capa más baja a 625 m de elevación para mayor claridad. En la Figura 1 se muestra la ubicación de las secciones longitudinales.

CONCLUSIONES

En este trabajo se ha aplicado una combinación de técnicas geológicas, geomorfológicas y geofísicas para reconstruir la estructura y el mecanismo de movimiento de un gran deslizamiento de tierra que afectó a la localidad de Albuñuelas, en el sur de España.

Entre estas técnicas, los métodos sísmicos pasivos han desempeñado un papel especial. El uso intensivo y extensivo del ruido ambiente ha proporcionado una evaluación general de la frecuencia de resonancia fundamental y el espesor del relleno sedimentario, estimando la extensión lateral del deslizamiento y la profundidad hasta la superficie de rotura.

Las ventajas de estos métodos de sismica pasiva están relacionadas principalmente con su naturaleza no invasiva. Se pueden realizar más rápidamente que los métodos de perforación y son mucho más económicos. Además, en lugares de difícil acceso, los métodos basados en medidas de ruido ambiente pueden ser la única opción para investigaciones geotécnicas. Otro aspecto importante de los métodos pasivos está relacionado con el volumen de suelo involucrado en el estudio, más amplio que los métodos de perforación. Por todas estas razones, las mediciones sísmicas pasivas están ganando importancia en los últimos años para la caracterización dinámica del suelo y las investigaciones de deslizamientos de tierra. Además, una sinergia estricta entre los estudios geológicos, los sondeos y los estudios sísmicos permite una reducción adicional de las incertidumbres relevantes durante la inversión de datos.

Los resultados obtenidos han permitido construir dos cortes longitudinales que muestran la estructura interna de este deslizamiento. Es una ladera con un deslizamiento rotacional organizado en varios bloques con diferentes grados de desplazamiento (rotación). La superficie de rotura basal se encuentra a más de 60 m en las partes superiores del deslizamiento y a unos 50 m en su sección media, volviéndose menos profunda hacia el pie. El estudio ha demostrado la importancia de la incisión fluvial y la erosión del relleno sedimentario de la cuenca, donde una parte importante del mismo ha sido removida por la erosión fluvial, contribuyendo a la desestabilización de las partes no erosionadas. Además, los resultados muestran que la estructura general del área, con materiales buzantes hacia la cara libre del talud, también contribuye a la ocurrencia de este deslizamiento.

REFERENCIAS

- [1] Chacón, J., Irigaray, C. y El Hamdouni, R. (1997) Informe sobre exposición a riesgos derivados de los movimientos de ladera en Albuñuelas (Granada). Incidencia de las lluvias de noviembre a enero de 1996/97. Memoria Técnica. Ayuntamiento de Albuñuelas. 1997, 34 p. + 3 Annexes.
- [2] IGN (1980) El terremoto de Andalucía de 25 de diciembre de 1884. Instituto Geográfico Nacional, Madrid, 1980, 139 p.
- [3] Chacón, J., Irigaray, C. y El Hamdouni, R. (2007) "Vuelco de viviendas de la población de Albuñuelas (Granada). Informe Final. Contrato Fundación Empresa-Universidad de Granada". Ayuntamiento de Albuñuelas., 43 pp + 3 annexes.
- [4] Fernández, P., Irigaray, C., Jiménez, J., El Hamdouni, R., Crosetto, M., Monserrat, O. y Chacón, J. (2009) "First delimitation of areas affected by ground deformations in the Guadalfeo river valley and Granada metropolitan area (Spain) using the InSAR technique", *Engineering Geology*, 105, 84-101.
- [5] Cruden, D.M. y Varnes, D.J. (1996) Landslide type and processes. In: Turner, A.K., Schuster, R.L. (Eds.), "Landslides. Investigation and Mitigation. Special Report". Transportation Research Board. National Academy Press, Washington, 36-75.
- [6] Duncan, J.M., Wright, S.G. (2005) "Soil strength and slope stability". J. Willey & Sons, Hoboken (N.J.). p 312.
- [7] Jongmans, D. y Garambois, S. Geophysical investigation of landslides: A review. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 178, 101-112. <https://doi.org/10.2113/gssgfbull.178.2.101>
- [8] Rogers, J.D. y Chung, J. (2007) "A review of conventional techniques for subsurface characterization of landslides." *Environ. Earth Sci.*, 76:120. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-6353-3>.
- [9] Pazzi, V., Morelli, S. y Fanti, R. A (2019) "Review of the advantages and limitations of geophysical investigations in landslide studies". *International Journal of Geophysics*, 2983087, 27 p. <https://doi.org/10.1155/2019/2983087>.
- [10] Méric, O., Garambois, S., Jongmans, D., Wathélet, M., Chatelain, J.L. y Vengeon, J.M. (2005) "Application of geophysical methods for the investigation of the large gravitational mass movement of Séchilienne, France". *Canadian Geotechnical Journal*, 42, 1105-1115.
- [11] Reyes-Carmona, C., Galve, J.P., Moreno-Sánchez, M., Riquelme, A., Ruano, P., Millares, A.; Teixidó, T., Sarro, R.; Pérez-Peña, J.V., Barra, A., Ezquerro, P., López-Vinielles, J., Béjar-Pizarro, M., Azañón, J.M., Monserrat, O., Mateos, R.M. (2021) Rapid

characterisation of the extremely large landslide threatening the Rules reservoir (S Spain). *Landslides*, 18, 3781-3798. <https://doi.org/10.1007/s10346-021-01728-z>.

[12] Perrone, A., Iannuzzi, A., Lapenna, V., Lorenzo, P., Piscitelli, S., Rizzo, E. y Sdao, F. (2004) "High-resolution electrical imaging of the Varco d'Izzo earthflow (southern Italy)". *Journal of Applied Geophysics*, 56(1), 17-29.

[13] Szalai, S., Szokoli, K., Metwaly, M., Gribovski, Z. y Prácser, E. "Prediction of the location of future rupture surfaces of a slowly moving loess landslide by electrical resistivity tomography". *Geophysical Prospecting*, 65(2), 596-616.

[14] Méric, O., Garambois, S., Malet, J., Cadet, H., Guéguen, P. y Jongmans, D. (2007) "Seismic noise-based methods for soft-rock landslide characterization". *Bulletin de la Société Géologique de France*, 178, 137-148.

[15] Imposa, S., Grassi, S., Fazio, F., Rannisi, G. y Cino, P. (2017) "Geophysical surveys to study a landslide body (NE Sicily)". *Nat. Hazards*, 87, S327-S343. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2544-1>.

[16] Del Gaudio, V., Wasowski, J., Hu, W., Capone, P., Venisti, N. y Li, Y. (2021) "Ambient noise and ERT data provide insights into the structure of co-seismic rock avalanche deposits in Sichuan (China)". *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 80, 7153-7170.

[17] Delgado, J., Galiana-Merino, J.J., García-Tortosa, F.J., Garrido, J., Lenti, L., Martino, S., Peláez J.A., Rodríguez-Peces, M.J.; de Galdeano, C. y Soler-Llorens, J.L. (2021) "Ambient noise measurements to constrain the geological structure of the Güevéjar landslide (S Spain)". *Appl. Sci.*, 11, 1454. <https://doi.org/10.3390/app11041454>.

[18] Nakamura, Y. (1989) "A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface". *Railway Technical Research Institute, Quarterly Reports*, 30.

[19] Aki, K. (1957) "Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors". *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, 35, 415-456

[20] Ohori, M., Nobata, A. y Wakamatsu, K. A (2002) "Comparison of ESAC and FK methods of estimating phase velocity using arbitrarily shaped microtremor analysis", *Bull. Seism. Soc. Am.*, 92, 2323-2332.

[21] Okada, H. (2003) "The Microtremor Survey Method", *Geophysical Monograph series 12*, M. W. Asten (Editor), Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, Oklahoma.

[22] Capon, J. (1969) "High-resolution frequency-wavenumber spectral analysis". *Proceedings of the IEEE*, 57, 1408-1419.

[23] Lacoss, R.T., Kelly, E.J. y Toksoz, M.N. (1969) "Estimation of seismic noise structure using Array". *Geophysics*, 29, 21-38.

[24] Bonnefoy-Claudet, S., Köhler, A., Cornou, C., Wathelet, M. y Bard, P.Y. (2008) "Effects of Love waves on microtremor H/V ratio". *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 98, 288-300.

[25] Parolai, S., Mucciarelli, M., Gallipoli, M.R., Richwalski, S.M. y Strollo, A. (2007) "Comparison of empirical and numerical site responses at the Tito Test Site, Southern Italy". *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 97, 1413-1431.

[26] Endrun, B., Ohrnberger, M. y Savvaidis, A. (2010) "On the repeatability and consistency of three-component ambient vibration array measurements". *Bull. Earthq. Eng.*, 8, 535-570.

[27] Parolai, S., Picozzi, M., Richwalski, S.M. y Milkereit, C. (2005) "Joint inversion of phase velocity dispersion and H/V ratio curves from seismic noise recordings using a genetic algorithm, considering higher modes". *Geophys. Res. Lett.*, 32, L01303.

[28] Picozzi, M., Parolai, S. y Richwalski, S.M. (2005) "Joint inversion of H/V ratios and dispersion curves from seismic noise: estimating the S-wave velocity of bedrock". *Geophys Res Lett*, 32: L11308.

[29] Galiana-Merino, J.J., Mahajan, A.K., Lindholm, C., Rosa-Herranz, J., Mundepi, A.K. y Rai, N. (2011) "Seismic noise array measurements using broadband stations and vertical geophones: preliminary outcomes for the suitability on f-k analysis". *Bull. Earthq. Eng.*, 9, 1309-1325.

- [30] Rosa-Cintas, S., Galiana-Merino, J.J., Rosa-Herranz, J., Molina, S. y Giner-Caturla, J. (2012) "Suitability of 10 Hz vertical geophones for seismic noise array measurements based on frequency-wavenumber and extended spatial autocorrelation analyses". *Geophysical Prospecting*, 61, p. 183-198. doi: 10.1111/j.1365-2478.2012.01114.x.
- [31] Arai, H. y Tokimasu, K. (2004) "S-wave velocity profiling by inversion of microtremor H/V spectrum". *Bulletin of the Seismological Society of America*, 94(1), 53-63.
- [32] Asten, M.W., y Henstridge, J.D. (1984) "Array estimators and use of microseisms for reconnaissance of sedimentary basins". *Geophysics*, 49, 1828-1837.
- [33] Council, B.S.S. (2009) NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures (FEMA P-750). Washington, DC.
- [34] Avidad, J., García-Dueñas, V., Gallegos, J.A., y González Donoso J.M. (1981): "Mapa geológico de España, E:1:50.00, Hoja 1041 (Dúrcal)". IGME, Madrid, 45 p.

Instrumento de gestão de áreas contaminadas por metais combinando dados de Química, Geofísica, Detecção Remota, Inteligência Artificial e Gestão – Projeto INCOME

Instrument for managing areas contaminated by metals combining data from Chemistry, Geophysics, Remote Sensing, Artificial Intelligence and Management – INCOME Project

OLIVEIRA, Rui J. ^(1*); CALDEIRA, Bento ⁽¹⁾; PALMA, Patrícia ⁽²⁾; COSTA, Maria J. ⁽¹⁾; FIALHO, Ana ⁽³⁾

⁽¹⁾ Universidade de Évora, Departamento de Física, CREATE - Centro de Investigação em Ciência e Tecnologia para o Sistema Terra e Energia, Earth Remote Sensing Laboratory, Évora, Portugal.

⁽²⁾ Instituto Politécnico de Beja, Departamento Tecnologias e Ciências Aplicadas, Beja; CREATE - Centro de Investigação em Ciência e Tecnologia para o Sistema Terra e Energia, Évora; GeoBioTec, NOVA School of Science and Technology, Caparica, Portugal.

⁽³⁾ Universidade de Évora, Departamento de Gestão, Évora; Centro de Investigação em Contabilidade e Fiscalidade, IPCA, Barcelos, Portugal.

* Autor correspondente: ruio@uevora.pt

RESUMO

O Projeto INCOME tem como objetivo propor a criação de um modelo de gestão ambiental para áreas mineiras contaminadas por metais potencialmente tóxicos. Este modelo integra os resultados da aplicação de um conjunto de métodos analíticos e instrumentos de monitorização de áreas contaminadas, como análises da vegetação, química de solos e águas, geofísica e deteção remota por satélite. Estes dados serão utilizados como inputs em algoritmos de inteligência artificial, o que permitirá a produção de modelos de monitorização da contaminação utilizando menos dados do que as metodologias-padrão. Propõe-se a criação de um modelo de gestão sustentável, baseado na combinação de ferramentas a desenvolver, que permitirá a otimização e poupança de recursos nas fases de amostragem e análise, fornecendo informação importante em tempo real para a tomada de decisão com vista à gestão integrada das áreas contaminadas. O instrumento terá ampla aplicabilidade na deteção de contaminação por metais, abrindo a possibilidade à transferência de tecnologia para diferentes áreas geográficas e para outros cenários de contaminação por metais, como aterros sanitários, indústria e explorações agrícolas. O retorno ambiental, social e económico para as áreas contaminadas deriva da incorporação de novas estratégias às rotinas atuais; redução e otimização de procedimentos e tempos de execução; economia de recursos; recuperação mais eficaz do local contaminado; equilíbrio dos ecossistemas; retorno para empresas; redução da pegada ambiental; e promoção da sustentabilidade social, ambiental e económica da região.

PALAVRAS-CHAVE

Química Ambiental, Geofísica Aplicada, Detecção Remota, Inteligência Artificial, Locais mineiros abandonados, Solos contaminados por metais.

INTRODUÇÃO

A extração mineira é uma realidade em todo o planeta (Figura 1) sendo indispensável para o desenvolvimento económico de diversos países [1]. Dos elementos mais explorados, destacam-se os metais para a construção de equipamentos elétricos e eletrónicos, combustíveis para o uso em veículos, e para uso no fabrico de cosméticos e produtos farmacêuticos, e na construção de edifícios e vias de comunicação. Os dados das quantidades de metais extraídos no mundo refletem a importância da atividade. Em 2021 (WMD2023), a extração mundial foi de 17.9 biliões de toneladas, e em Portugal atingiu os 1.15 milhões de toneladas.

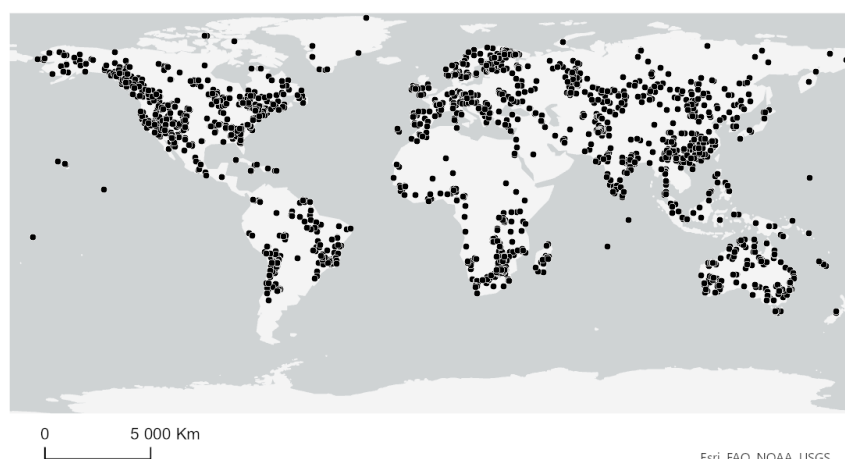


Figura 1: Ocorrências mineiras mundiais [2].

Em Portugal existem três minas atualmente em laboração, a Mina da Panasqueira (Volfrâmio), Neves Corvo e Aljustrel (Cobre).

A indústria extrativa possui um impacto ambiental negativo que deve ser mitigado após o encerramento das minas. A exploração mineira em Portugal nem sempre contemplou a minimização de impactos ambientais [3]. Apenas empresas em laboração contemplam a proteção ambiental associada à da exploração no quadro legislativo [4]. Existem vários locais mineiros abandonados em território português que possuem sérios problemas de contaminação de solos e águas por falta de recuperação ambiental após o encerramento destas minas. Exemplos mais graves de minas abandonadas nestas condições são as Mina da Urgeiriça (Urânio) e Mina de São Domingos (Surfuretos).

MINA DE SÃO DOMINGOS

A Mina de São Domingos, localizada no Alentejo no concelho de Mértola (integrada na Faixa Piritosa Ibérica), laborou entre 1855 e 1966. O minério extraído possuía as seguintes percentagens de elementos metálicos principais: 45-48% de enxofre, 1,25% de cobre, 2-3% de zinco (Figura 2) [5].



Figura 2: Localização da Mina de São Domingos e seu enquadramento regional no que respeita às principais linhas de água, como o Rio Chança e Rio Guadiana.

O complexo mineiro estende-se ao longo de quase 20 km desde a aldeia da Mina de São Domingos até à localidade de Pomarão, em que o minério era transportado em linha férrea para ser posteriormente expedido em barcos ao longo do Guadiana. Ao longo do trajeto em terra, foram depositadas escombrelas resultantes da extração que possuem altos níveis de contaminantes por metais potencialmente tóxicos (MPT), destacando-se o cobre, chumbo, zinco, arsénico e antimónio.

Uma área mineira abandonada acarreta problemas de contaminação ambiental graves nos solos e águas, com desregulação dos ecossistemas envolvidos e que se pode traduzir a médio-longo prazo num problema de saúde pública. Um dos maiores problemas associados a explorações mineiras de pirites, como a Mina de São Domingos, é a produção de efluentes mineiros de drenagem ácida, com elevadas concentrações de metais, os quais têm origem na oxidação de sulfuretos existentes nestes resíduos acumulados à superfície [6].

No *ranking* de perigosidade ambiental, realizado pelo extinto Instituto Geológico e Mineiro, as minas da Faixa Piritosa Ibérica são classificadas de risco elevado devido ao grande volume de escombrelas, as quais contêm teores acentuados em MPT.

As Minas de S. Domingos, Aljustrel e Caveira destacam-se ainda pela presença de áreas significativas cobertas por escombros de rocha encaixante da mineralização, minério, escórias e materiais lixiviados [7].

A área de S. Domingos possui características próprias capazes de promover um problema ainda maior: a mina, instalações de apoio e escombrelas encontram-se localizadas ao longo de uma linha de água que drena para o rio Chança, que, por sua vez, possui uma barragem, junto à sua foz com o rio Guadiana, junto à localidade de Pomarão (ambos rios internacionais). A barragem do rio Chança armazena água para consumo humano em Espanha e o rio Guadiana fornece água para utilização agropecuária.

A exposição humana a MPT, quer por consumo de água contaminada, quer por ingestão de alimentos contaminados, pode promover, a médio-longo prazo, a redução da saúde geral da população, levando ao aumento das taxas de morbilidade com altos custos médicos [8]. O risco para a saúde humana devido à contaminação dos recursos abióticos por metais tornou-se uma importante questão económica e social nas sociedades atuais [9]. Os contaminantes do solo podem ser responsáveis por efeitos na saúde que custam milhões de euros, mas os estudos económicos para quantificar o verdadeiro custo estão ainda em fase embrionária. Problemas de saúde, desde cancro (arsênico, amianto, dioxinas), danos neurológicos (chumbo, arsênico), doenças renais (chumbo, mercúrio, cádmio) a doenças ósseas (chumbo, flúor, cádmio) são reportados mundialmente por exposição a MPT [10]. De facto, estudos epidemiológicos em todo o mundo, relatam a correlação entre doenças humanas e solos contaminados por metais, destacando a necessidade de estratégias de remediação para diminuir o custo de solos contaminados que podem influenciar a cadeia alimentar.

O complexo da Mina de São Domingos não possui qualquer edificação urbana, a não ser a localidade junto à corta, onde viviam os mineiros e ainda vivem as suas famílias.

Entre 2015 e 2022, a Empresa de Desenvolvimento Mineiro, S.A. realizou ações de recuperação ambiental no local, tendo sido realizadas obras de recuperação do sistema de canais de recolha de águas de escorrência superficial em duas fases, que terminaram em 2020 e 2022, tendo sido investidos 7.218.051,35 €.

ESTUDO DE UM LOCAL CONTAMINADO POR METAIS – PROJETO INCOME

O estudo e controlo de um local mineiro contaminado por metais como a Mina de São Domingos, que possui uma área de cerca de 2000 ha, implica que se faça amostragem de solos e águas, em vários pontos ao longo do tempo. A quantificação dos MPT é obtida por análise química laboratorial. Para um local mineiro abandonado não existem regras estabelecidas para a escolha do espaçamento entre amostras, mas se considerarmos a legislação que existe para amostragem de solos agrícolas, em que é necessário fazer amostragem a cada 5 ha, no caso da mina, haveria necessidade de se obter amostras em 400 localizações, o que acarreta custos operacionais muito elevados apenas para se estudar o local num único momento, a somar aos elevados custos das ações de recuperação ambiental. O controlo e remediação são processos bastante demorados e nem sempre existe financiamento disponível para o efeito de uma forma contínua e eficaz de modo a resolver o problema ambiental do local.

A contaminação por MPT da Mina de São Domingos tem sido alvo de investigação científica de diversas equipas. Entre 2004 e 2022 foram publicados vários artigos científicos onde se encontram os principais resultados e conclusões. A análise das informações disponíveis nessas fontes bibliográficas permite verificar que os estudos realizados em São Domingos não são capazes de cobrir toda a área do complexo mineiro (Figura 3).



Figura 3: Localização de vários pontos de amostragem de solos em que foram efetuadas análises de quantificação de MPT entre 2004 e 2022, e fotografias de vários setores da Mina de São Domingos (fonte: projeto INCOME). Os retângulos a vermelho representam as quatro áreas a estudar durante o projeto.

Desde 2023, encontra-se em execução o Projeto INCOME – Inputs para uma região mais sustentável – Instrumentos para a gestão de zonas contaminadas por metais (Fundação la Caixa). A investigação é desenvolvida por um consórcio criado para o efeito, constituído por Instituições de Ensino Superior (Universidade de Évora, Instituto Politécnico de Beja e Universidade de Granada), Unidades I&D (CREATE, MARE, ICT, CICEF, VISTA LAB e CIMA), uma autarquia (Câmara Municipal de Mértola), uma agência governamental que atua na área do ambiente (Agência Portuguesa do Ambiente), duas empresas privadas (La Sabina, S.A., e Empresa de Desenvolvimento Mineiro, S.A.) e uma fundação (Fundação Serrão Martins), que conjuga a investigação realizada com o conhecimento e a informação dos *stakeholders* do projeto (Figura 4).



Figura 4: Parceiros do Projeto INCOME.

Este projeto propõe a criação de um modelo de gestão ambiental para áreas mineiras contaminadas por metais potencialmente tóxicos. O modelo integrará os resultados da aplicação de um conjunto de métodos e instrumentos de análise para a monitorização das áreas contaminadas, tais como, análise da vegetação; química de solos e águas, geofísica, deteção remota hiperespectral e inteligência artificial. Os *inputs* para a sustentabilidade das regiões contaminadas serão alcançados através da otimização e poupança de recursos (humanos e financeiros) nas etapas de amostragem e análise laboratorial, controle e gestão da contaminação por metais em tempo real.

A análise da vegetação na Mina de São Domingos permite identificar as espécies vegetais capazes de existir em condições de contaminação por MPT. Algumas delas são capazes de incorporar MPT, podendo desempenhar um papel importante na remediação ambiental do local. Estudos anteriores identificaram várias espécies vegetais no local [11], destacando-se as seguintes (mais abundantes): *Erica andevalensis*, *Anarrhinum bellidifolium*, *Lavandula stoechas*, e *Cistus ladanifer* (Figura 5).

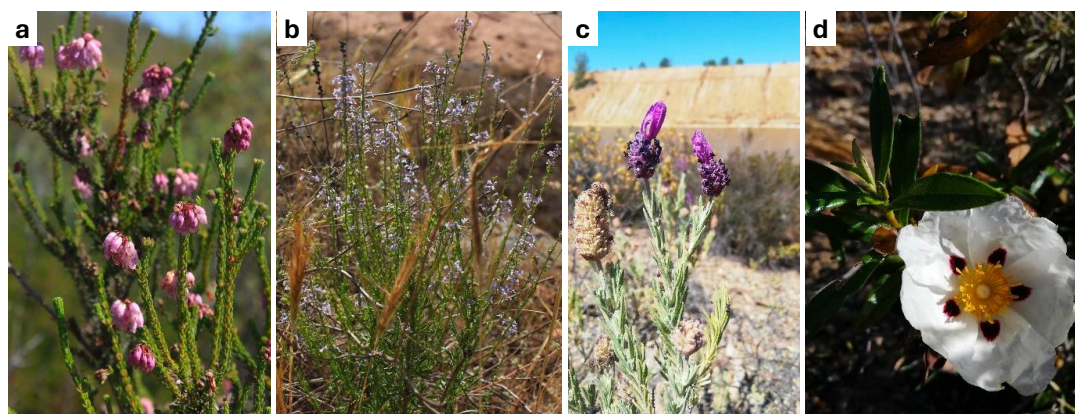


Figura 5: Espécies vegetais mais abundantes na Mina de São Domingos [11]: (a) *Erica andevalensis*, (b) *Anarrhinum bellidifolium*, (c) *Lavandula stoechas*, e (d) *Cistus ladaniferii*.

A análise química de solos e águas permite fazer quantificação de metais. Ao longo da linha de água onde se localizam as escombreyras são conhecidos os setores mais contaminados. Na Tabela 1 encontram-se representadas as concentrações de MPT no solo de três setores da mina, obtidos por Alvarenga et al. (2012). Os níveis de contaminação são diferentes nos três setores considerados: o arsénico, cádmio e níquel existem em maior quantidade no setor A, o chumbo, cobre, zinco no setor B, e o crómio no setor C.

Tabela 1: Concentrações de elementos-traço de frações do solo de três setores da Mina de São Domingos (Alvarenga et al., 2012).

Local	Quantificação de metais (mg.kg ⁻¹)						
	As	Cu	Zn	Pb	Cd	Cr	Ni
A	7955,00	202,00	84,00	26,98	3,38	17,00	14,20
B	674,00	434,00	168,00	3920,00	1,87	8,80	10,00
C	961,00	224,00	137,00	1624,00	2,60	24,70	12,00

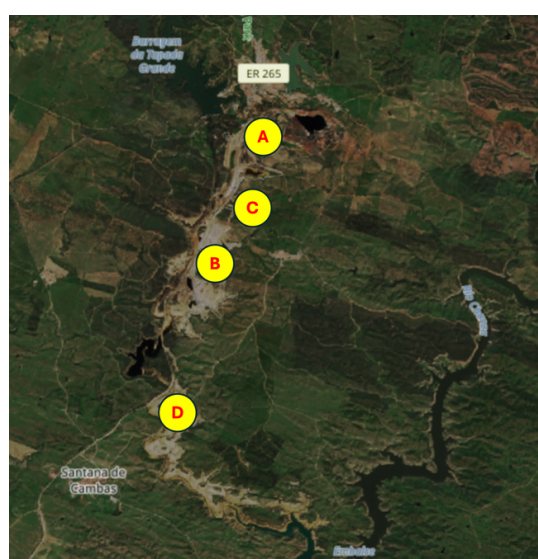


Figura 5: Localização dos pontos de amostragem considerados e dos levantamentos geofísicos experimentais realizados.

A geofísica aplicada permite caraterizar o interior das escombreyras mineiras, nomeadamente para estimar o volume de materiais acumulados e caraterizar os solos contaminados. Antes de se aplicarem os diversos métodos disponíveis há necessidade de

realizar levantamentos experimentais, para avaliar a sua aplicabilidade no que respeita à obtenção de dados com informação útil. Na Figura 6 encontram-se representados valores de condutividade elétrica obtidos em dois setores da mina com o método de indução eletromagnética. Os valores mais elevados (cor azul) estão localizados nos locais mais contaminados. No setor D, existe uma barragem de retenção de sedimentos. Os valores mais elevados encontram-se a montante da barragem; a jusante os valores são menores, significando que a barragem está a desempenhar com eficácia o seu propósito. Este método funciona num local contaminado por metais, tendo sido selecionado para ser aplicado nas várias áreas de estudo. Por outro lado, o método magnético, também testado nos mesmos setores, não mostrou ser eficaz, uma vez que a sua representação no espaço não apresenta contrastes, e por isso não foi selecionado para ser aplicado nas áreas de estudo do projeto.

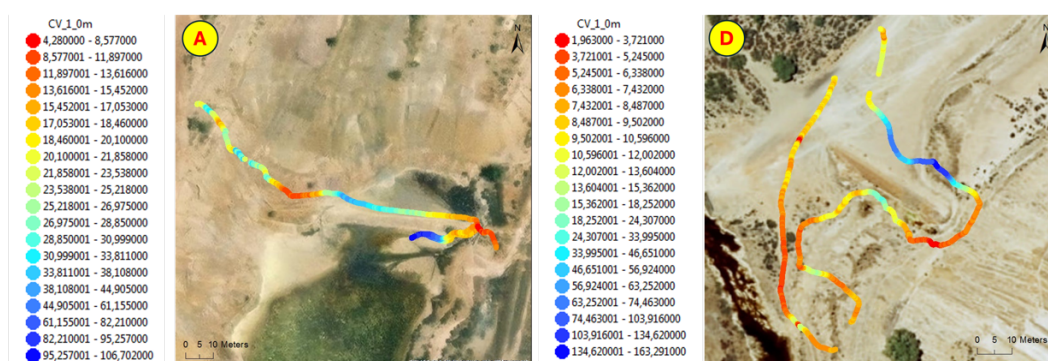


Figura 6: Resultados do método de indução eletromagnética obtidos em alguns setores da Mina de São Domingos durante um levantamento preliminar para avaliar a capacidade do método produzir resultados úteis para a identificação de MPT em solos.

A deteção remota por satélite permite efetuar a caracterização ótica dos materiais que existem à superfície, nomeadamente com dados hiperespectrais, sendo objetivo o estabelecimento de correspondências entre os materiais identificados com dados satélite e os MPT. Considerando os dados multiespectrais de Sentinel-2 do Programa Copernicus obtidos sobre a mina (Figura 7), a caracterização ótica de diversos modos de visualização (cor verdadeira, cor falsa, índices NDVI e NDVI e imagem classificada), permite determinar que locais correspondem a escombros mineiros e que conseqüente estarão mais contaminados.

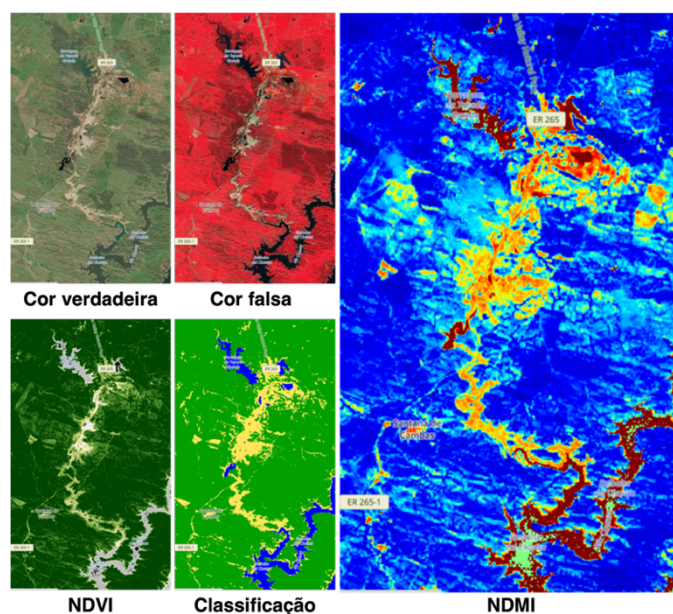


Figura 7: Representação de vários produtos obtidos pelo satélite Sentinel-2 (Programa Copernicus) sobre a Mina de São Domingos. Podem-se considerar imagens com cor verdadeira ou com cor falsa, classificação em diferentes materiais e podem ser calculados índices como NDVI e NDVI, que permitem distinguir, por exemplo, entre terreno com e sem vegetação.

A inteligência artificial terá um papel fundamental no desenvolvimento do modelo de contaminação dos solos, na medida em que a partir dos inputs dos diferentes métodos de análise serão identificados mapas de contaminação dos solos da Mina. Para

isso, serão usados algoritmos de *machine learning* para treinar os dados. O objetivo é que se torne possível usar como input principal dados hiperespectrais de satélite para obter mapas de contaminação, o que tornará o processo de identificação dos locais mais contaminados (maior risco) mais rápido e, consequentemente com custos operacionais mais baixos, por comparação com as metodologias atualmente aplicadas.

O modelo em desenvolvimento, será replicável a outras regiões e outros ambientes, o que se traduz num valor acrescentado que poderá permitir gerar retorno económico aliado a atividades de investigação científica. A transferência do conhecimento para a sociedade e tecido empresarial é um dos objetivos do projeto e será realizada com recurso a técnicas de gestão, nomeadamente através de um plano de comercialização do modelo baseado em estudos de mercado e de viabilidade económica e financeira.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O instrumento de gestão de contaminações por metais em solos mineiros abandonados constitui uma ferramenta útil para conhecer o estado de contaminação de um local com tempo de análise mais reduzido que os métodos convencionais, usando técnicas de deteção remota por satélite aliado a metodologias de inteligência artificial.

A investigação que se encontra a ser desenvolvida no âmbito do projeto INCOME contribuirá para um aumento da qualidade de vida das populações envolvidas, assim como das condições ambientais, podendo fomentar oportunidades de criação de riqueza na região, nomeadamente através da promoção do turismo mineiro (que já se observa na Mina de São Domingos), turismo científico, e da reutilização de resíduos, promovendo-se a economia circular. Também contribui para a concretização de alguns indicadores da Agenda 2030 da ONU nomeadamente para algumas metas do ODS 15 – Proteger a Vida Terrestre.

AGRADECIMENTO

Este trabalho é apoiado pelo Programa Promove da Fundação “la Caixa”, em parceria com o BPI e a Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT), no âmbito do projeto INCOME – Inputs para uma região mais sustentável: Instrumentos para a gestão de zonas contaminadas por metais, PD23-00013, e por fundos nacionais pela Fundação para a Ciência e Tecnologia, I.P., no âmbito da UID/06107/2023 – Centro de Investigação em Ciência e Tecnologia para o Sistema Terra e Energia.

REFERÊNCIAS

- [1] Walser, G. (2002). Economic impact of world mining. IAEA.
- [2] Labay, K., Burger, M.H., Bellora, J.D., Schulz, K.J., DeYoung, J.H., Jr., Seal, R.R., II, Bradley, D.C., Mauk, J.L., and San Juan, C.A., 2017, Global Distribution of Selected Mines, Deposits, and Districts of Critical Minerals: U.S. Geological Survey data release, <https://doi.org/10.5066/F7GH9GQR>.
- [3] Santos Oliveira, J. M. (1997). Algumas reflexões com enfoque na problemática dos riscos ambientais associados à actividade mineira. Estudos, Notas e Trabalho – Instituto Geológico e Mineiro (IGM) 39, 3-25.
- [4] Lei de Bases do Ambiente (Lei nº 11/87, 1987).
- [5] Sítio eletrónico da Empresa de Desenvolvimento Mineiro, SA: Recuperação Ambiental da Área Mineira de São Domingos. <https://edm.pt/projetos/recuperacao-do-sistema-de-canais-de-recolha-de-aguas-de-escurrencia/>. Consultado em 31 de janeiro de 2025.
- [6] Santos Oliveira, J. M., Farinha, J., Matos, J. X., Ávila, P., Rosa, C., Machado, M. J. C., Daniel, F. S., Martins, L., Leite, M. R. M. (2002). Diagnóstico Ambiental das Principais Áreas Mineiras Degradadas do País. Boletim de Minas – Instituto Geológico e Mineiro (IGM) 39(2), 67-85.
- [7] Guanter, L., Kaufmann, H., Segl, K., Foerster, S., Rogass, C., Chabrillat, S., Kuester, T., Hollstein, A., Rossner, G., Chlebek, C., Straif, C., Fischer, S., Schrader, S., Storch, T., Heiden, U., Mueller, A., Bachmann, M., Mühle, H., Müller, R., Habermeyer, M., Ohndorf, A., Hill, J., Buddenbaum, H., Hostert, P., van der Linden, S., Leitão, P., Rabe, A., Doerffer, R., Krasemann, H., Xi, H., Mauser, W., Hank, T., Locherer, M., Rast, M., Staenz, K., Sang, B. (2015). The EnMAP Spaceborne Imaging Spectroscopy Mission for Earth Observation. Remote Sens. 2015, 7(7), 8830-8857.
- [8] Mouazen AM, Nyarko F, Qaswar M, Tóth G, Gobin A, Moshou D. Spatiotemporal Prediction and Mapping of Heavy Metals at

Regional Scale Using Regression Methods and Landsat 7. Remote Sensing. 2021; 13(22):4615.

[9] Shi S, Hou M, Gu Z, Jiang C, Zhang W, Hou M, Li C, Xi Z. Estimation of Heavy Metal Content in Soil Based on Machine Learning Models. Land. 2022; 11(7):1037.

[10] Aggarwal, CC, Kong X, Gu Q, Han J, Yu, PS. Active learning: A survey. In Data Classification: Algorithms and Applications (pp. 571-605). CRC Press, 2014.

[11] Domingues, I. (2020). *Ecophysiological Characterization of Metallophyte Species Candidates for Phytoremediation* (Master's thesis, Universidade de Lisboa (Portugal)).

