



XI Congresso Nacional de Geomorfologia



Inovações tecnológicas e aplicações para o
ordenamento do território



Associação Portuguesa de Geomorfólogos – Volume XIII

XI CONGRESSO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA

**Inovações tecnológicas e aplicações para o
ordenamento do território**

ASSOCIAÇÃO PORTUGUESA DE GEOMORFÓLOGOS

PORTO, 2026

Título: XI Congresso Nacional de Geomorfologia

Inovações tecnológicas e aplicações para o ordenamento do território

Coordenadores: José Teixeira, Marcelo Fernandes, Paulo Pereira, Raquel Melo e Susana Pereira.

Editor: Associação Portuguesa de Geomorfólogos

Comissão científica: Adélia Nunes, Alberto Gomes, Ana Ramos Pereira, António Campar, António Martins, António Vieira, Carlos Bateira, Carlos Loureiro, Fernando Costa, Gonçalo Vieira, Hélder Chaminé, João Forte, Jorge Trindade, José Luís Zêzere, José Teixeira, Luca Dimuccio, Lúcio Cunha, Margarida Porto Gouveia, Marcelo Fernandes, Paulo Pereira, Pedro Pinto Santos, Pedro Proença Cunha, Raquel Melo, Ricardo Garcia, Sérgio Oliveira, Susana Pereira.

Capa (conceção e fotografia): Daniela Duarte e Jorge Costa

ISBN: 978-989-96462-9-2

Ano de edição: 2026

Organização 2026:



Fundação
para a Ciência
e a Tecnologia



Ref. UID/04084/2025

Índice

Nota de Abertura	6
Capítulo I - Geomorfologia Cársica	8
Using river long profile analysis to support more informative geotouristic routes: the case of “Gravina di Castellaneta” fluviokarst canyon (southern Italy)	
V. Venezia, L. A. Dimuccio, L. Sabato, M. Tropeano	9
CT-TreeFlow (Conditional Tree-Based Flow): A Spatially Adaptive Probabilistic Framework for Groundwater Potential Mapping with Quantified Uncertainty in Karst Aquifers	
S. Pourmorad, M. Kabolizade, R. Ferreira, L. A. Dimuccio	15
Cave rocky relief features indicative of a possible hypogenic origin of Lapa das Almoinhas (Leiria, central Portugal): preliminary insights	
L. A. Dimuccio, D. Amaral.....	20
Los bufones de Pría: morfología, tipología e implicaciones geopatrimoniales en la costa oriental asturiana	
L. Núñez de Con, J. Ruiz-Fernández	27
Capítulo II - Geomorfologia litoral.....	31
Modelagem do nível do mar como subsídio ao ordenamento territorial de Galinhos – Rio Grande do Norte, Brasil 2024 e 2100	
J. Silva, M. Diniz, J. Santos, T. Silva, R. Silva	32
Evolução preliminar da Linha de Costa entre o Cabo Mondego e a Costa de Lavos: o impacte da forte agitação e tempestades marítimas	
M. P. Gouveia, A. P. Fernandes, J. L. Rocha, J. A. Marques-Silva	37
Impactos de tempestades na evolução recente do sistema praia-arriba de Forte Novo (Algarve)	
P. Lourenço, B. Rodrigues, C. Loureiro.....	41
Coastal Geomorphological Features on the Middle Pliocene Limestone Wave-Cut Platform at Sagres, SW Portugal	
S. Abbasi, P. Cunha, A. Gomes, A. Martins, D. Moreno	46
Alongshore variability in morphological response to a sequence of extreme storms at Castelejo beach	
H. Epping, V. Kümmerer, C. Loureiro	50
Ebb-tidal Delta Shoal Migration and Updrift Attachment Observed through Satellite-Derived Bathymetries	
V. Kümmerer, V. Fanti, J. Santos, P. Cabrita, S. Costas	55
Morphosedimentary Dynamics Of The Sandy Coast Of Essaouira (Morocco): Multi-scale Analysis And Monitoring	
A. Khouz, J. Trindade, T. El Bchari, B. Bougadir.....	59

Dinâmica da largura de praia em Porto Santo derivada de imagens de satélite: sazonalidade e migração longilitoral

A.N. Silva, D. Pais, C. Ponte Lira, A.P. Bastos 64

Assessing the Relationship Between Watersheds and Coastal Cells Along the Moroccan Atlantic Coast

A. Elmimouni, K. Elhadiri, O. Larchim, F. Toufik, S. Charik 68

Capítulo III - Métodos e técnicas na geomorfologia 72

Mapa geomorfológico del sector de Penubina la Pequena (macizo de Peña Ubiña, Cordillera Cantábrica)

D. Cañedo 73

Deteção de processos erosivos lineares: eficácia do algoritmo Topographic Negative Openness em levantamentos LIDAR

S. L. Teixeira, S. Pereira 77

FozWaSe: adaptação de uma abordagem de monitorização integrada da qualidade de água e sedimentos no braço norte do estuário do Mondego

J. L. Rocha, M. Gouveia, A. P. Fernandes, J. A. Marques-Silva 82

Monitorização da Erosão Hídrica em Percursos Pedestres: Uma Proposta Metodológica baseada em LiDAR Móvel

C. Pinheiro, S. Pereira, A. Gomes 86

Deslizamentos na região de Lisboa: deteção e monitorização através de interferometria radar

M. Tafula, J. L. Zêzere 90

Análise de risco de estabilidade de taludes costeiros suportada por dados UAV-GPS de alta resolução: estudo exploratório

J. Antunes, J. Costa, J. Teixeira, P. Moreira, L. Freitas, A. Pires, C. F. Rodrigues, H. I. Chaminé 94

Deteção de estruturas mineiras abandonadas (poços) através de dados LiDAR de alta resolução (NW de Portugal)

R. Gutierrez, J. Teixeira, M. J. Dias Costa, H. I. Chaminé 98

Integração de Dados LiDAR na Otimização de Rotas de Combate a Incêndios Florestais: Acessibilidade a Fontes de Água e Modelação Geomorfológica

A. Viana, J. Teixeira 102

Monitorización de la dinámica de los arroyos estacionales de la Península Byers (Antártida) mediante cámaras time-lapse

J. Ruiz-Fernández, M. A. de Pablo, R. Menéndez-Duarte, J. Santos-González, A. Fernández-Fernández, L. Ferri-Hidalgo, A. Gómez-Pazo, C. A. Mansilla, L. Núñez de Con, M. Van den Bergh .. 106

Capítulo IV - Instabilidade de vertentes e erosão de solos 111

Modelagem preditiva da suscetibilidade à erosão por ravinamento no norte do Paraná (Brasil), baseada no método do Valor Informativo

G. Cruz, S. Pereira, H. Silveira 112

Avaliação da Modelagem de Erosão Hídrica no Semiárido Paraibano Brasileiro	
E. Teixeira, S. Pereira, R. Xavier, I. Neto, F. Alexandre, B. Vieira	117
Parametrização Física da Erodibilidade no Modelo SIMWE para Superfícies Lateríticas de Cimeira	
B. Tavares, F. Villela, S. Pereira, P. Vidal Torrado	122
Análise comparativa de limiares de precipitação simples e combinados para deteção de movimentos de vertente na ilha de São Miguel (Açores, Portugal)	
R. F. Silva, R. Marques, J. L. Zêzere	126
Dinâmica erosiva em diferentes cenários de precipitação: aplicação do modelo SIMWE	
S. L. Teixeira, S. Pereira, C. Bateira	131
Atributos morfológicos, texturais e químicos dos solos e a relação com a estabilidade de vertente na Serra do Tucano - Amazônia Setentrional	
R.A. Alves, L.D. Cunha.....	136
Contributo das redes sociais na elaboração de inventários de movimentos de vertente durante eventos meteorológicos extremos	
L. C. D. R. Rodrigues, S. Pereira.....	140
Dinâmica do Relevo e Intervenção Antrópica na Serra do Tepequém, Amazônia setentrional: Uma Abordagem Cartográfica de feições Erosivos e Depositionais	
L. C. Beserra Neta, S. S. Tavares Júnior, A. Gomes	144
A influência da erosividade da precipitação nas estimativas da perda anual de solos em culturas permanentes	
D. Duarte, C. Pinheiro, S. L. Teixeira, G. Lima, V. Nogueira, R. Pereira, M. Roboredo, L. Pereira, J. Coutinho, J. Domínguez, I. Alonso-Crespo, S. Pereira.....	149
Evento de instabilidade de vertentes de fevereiro de 2026 na Área Metropolitana de Lisboa e no Oeste: análise preliminar	
J. L. Zêzere, S. C. Oliveira, R. Melo, A. N. Silva, R. A. C. Garcia, C. Mora, H. Egas, P. P. Santos, G. Vieira.....	153
Modelação da Erosão Hídrica em vinhas de encosta na Região Demarcada do Douro: Análise Comparativa Pré e Pós-Intervenção na Rede de Drenagem	
S. Pereira, S. L. Teixeira, C. Bateira, C. Pinheiro, D. Duarte, J. Manso, S. Correia, A.R. Ferreira, A. Graça.....	158
Cartografia geomorfológica de ultra-alta resolução do movimento de vertente complexo de A-do-Mourão associado ao evento de fevereiro de 2026 na região de Lisboa	
R. Melo, J.L. Zêzere, S.C. Oliveira, A.N. Silva, R.A.C. Garcia, C. Mora, H. Egas, P.P. Santos, G. Vieira	162
Mapeamento detalhado de movimentos de vertente desencadeados durante o evento de fevereiro de 2026 com recurso a UAV: o estudo de caso do Lapão (Arruda dos Vinhos)	

S.C. Oliveira, J.L. Zêzere, R. Melo, R.A.C. Garcia, C. Mora, A.N. Silva, H. Egas, P.P. Santos, G. Vieira	166
Restauro de Corredores Ripícolas com Espécies Nativas: Uma Solução Baseada na Natureza para a Estabilização Geomorfológica e Proteção do Solo e da Qualidade da água	
M. Samussone, R. Xavier	171
Capítulo V - Riscos Geomorfológicos	175
Movimientos en masa e impacto del granizo extremo: la DANA de junio de 2016 en el occidente de Asturias	
D. Cañedo	176
Risco de inundação por níveis do mar extremos no litoral setentrional do Rio Grande do Norte (Brasil) com geotecnologias abertas	
T. C. L. Silva, M.T.M. Diniz, P.V.N. Araújo, J.Y.G. Dos Santos, J.P. Da Silva	181
Rainfall-Triggered Landslide Spatial Patterns: Insights from Event-Based and Historical Inventories	
C. Villaça, P. P. Santos, A. R. Moraes, S. Oliveira, J. L. Zêzere	186
Evolução Temporal e Variabilidade Espacial de Modelos de Suscetibilidade a Movimentos de Vertente no Vale da Ribeira Quente (Ilha de São Miguel, Açores)	
M. Silva, R. Marques, R. F. Silva, C. Andrade, P. Amaral	189
Avaliação da exposição às Áreas de Deformação Ativa (ADA) em Portugal continental com base em dados do European Ground Motion Service (EGMS)	
B. Duarte, J.L. Zêzere, R. Melo, N. Mileu, A. Barra, R. Palamà, M. Cuevas-González, O. Montserrat	194
Rede de Monitorização de Águas Subterrâneas do Empreendimento de Fins Múltiplos de Alqueva – Identificação de Áreas Vulneráveis e Otimização da Rede	
T. Piócas, R. A. C. Garcia, M. Murteira, A. Ilhéu	200
Avaliação da coocorrência de erosão laminar e em ravinas numa área de montanha afetada por incêndios florestais: um caso de estudo no Centro de Portugal	
B. Martins, C. Pinheiro, A. Nunes	204
A base de dados RISCAR: contributo para o conhecimento histórico de ocorrências de cheias e inundações, secas e galgamentos costeiros em Moçambique	
H. Nganhane, P.P. Santo, A.O. Tavares, G. Dge-Dge	209
O evento de cheia em Alcácer do Sal em janeiro e fevereiro de 2026: análise de fatores desencadeantes e agravantes e reconstituição da área inundável	
G. Batista, J. Caetano, M. Drummond, S. Martins do Ó, P.P. Santos	213
Capítulo VI - Geomorfologia glaciária e periglaciária	217
Geomorfología del alto Pigüña (Somiedo, Asturias)	
A. Romero, D. Cañedo	218
Cartografia geomorfológica e dinâmica glaciária no setor de Compadre (Serra do Gerês, NW Portugal)	

E. Figueir, A. Gomes, P. Pereira, J. Santos-González	224
Distribuição geográfica dos glaciares rochosos nos Pireneus espanhóis e andorranos: metodologia, problemas e primeiros resultados	
C. Severino, M. Fernandes, G. Vieira	229
Capítulo VII - Património geomorfológico	233
Itinerario geomorfológico por el entorno del Siega l'Abá (macizo de Peña Ubiña, Cordillera Cantábrica)	
D. Cañedo, A. Romero	234
Geodiversidade em Áreas Degradadas pelo Garimpo na Amazônia Setentrional Brasileira	
L. Cunha, I. Tavares, F. Nascimento, A. Gomes	238
Geoheritage quantitative assessment as a support for geoparks' management: case study in the M'goun UNESCO Global Geopark (Morocco)	
B. Ouacha, F. El Bchar⁵, J. Trindade, P. Pereira, J. Vieira, A. Souhel, P. Pereira	242
Assessing the link between hydrodiversity and hydrological geoheritage in Rio Grande do Norte (Brazil)	
M. Terto, M. Diniz, P. Pereira	246
Da Serra dos Órgãos (Brasil) a Montesinho (Portugal): estratégias de interpretação ambiental e geoconservação em percursos pedestres	
F. Pessoa	250
Capítulo VIII - eomorfologia estrutural	254
Geomorfologia e Geoarqueologia da Bacia do Rio Verde, Brasil: A Influência do Relevo na Ocupação Humana durante o Holoceno	
E. Silva, M. Bayer, J. Rubin, M. Fernandes	255
Mapeamento Geomorfológico de Roraima – Amazônia Setentrional (Folhas Surumu e Serra da Lua): Aplicação do SBCR sob o Controlo Litoestratigráfico de Cinturões Orogênicos	
S.S. Tavares Júnior, L.C. Beserra Neta, R. Vieira, S. Akenou, A. Gomes	259
Montanhismo Geológico na Serra dos Órgãos (Rio de Janeiro, Brasil)	
F. Pessoa	264

Nota de Abertura

A Associação Portuguesa de Geomorfólogos (APGEOM), em colaboração com o Departamento de Geografia da Faculdade de Letras da Universidade do Porto (FLUP), promoveu no Porto, entre 10 e 12 de setembro de 2026, o **XI Congresso Nacional de Geomorfologia**, subordinado ao tema *“Inovações tecnológicas e aplicações para o ordenamento do território”*. O evento estruturou-se em dois dias de sessões científicas e um dedicado ao trabalho de campo.

O congresso consolidou-se como um fórum estratégico de reflexão e debate sobre os avanços recentes na investigação geomorfológica e as respetivas aplicações diretas no planeamento e na gestão territorial. O programa científico integrou **34 comunicações orais** e **24 apresentações em formato de póster** (com discussão pública), reunindo autores de seis nacionalidades: Portugal, Brasil, Espanha, Marrocos, Moçambique e Itália.

Os trabalhos distribuíram-se por oito eixos temáticos: Geomorfologia Cársica; Geomorfologia Litoral; Geomorfologia Glaciar e Periglaciar; Geomorfologia Estrutural; Património Geomorfológico; Métodos e Técnicas em Geomorfologia; Instabilidade de Vertentes e Erosão de Solos; Riscos Geomorfológicos.

A sessão plenária acolheu duas conferências: *“The importance of geomorphology in modern-day landslide disaster risk reduction”*, proferida por **Mihai Micu** (Vice-Presidente da Associação Internacional de Geomorfologia e investigador no Instituto de Geografia de Bucareste), e *“Challenges in reconstructing the Paleoclimatic impact of the Neoglacial Crisis in Mountain Regions: case studies from Antarctica, Greenland, the Pyrenees, and Northern Iceland”*, apresentada por **David Palacios** (Professor Emérito da Universidade Complutense de Madrid).

Este Livro de Atas, publicado em formato digital no Volume XIII da Coleção de Publicações da APGEOM, reúne os resumos alargados submetidos ao congresso e submetidos a um rigoroso processo de revisão por pares, assegurado pelos membros da Comissão Científica.

O programa incluiu igualmente a saída de campo *“Peneda-Gerês: glacialismo, relevo e paisagem de montanha”*, focada na análise dos testemunhos geomorfológicos do glacialismo quaternário no setor norte do Parque Nacional da Peneda-Gerês — um dos expoentes ibéricos de relevo com herança glacial. O itinerário permitiu: (i) Caracterizar a morfologia e a distribuição espacial de formas de erosão e acumulação (circos, vales em U, blocos erráticos e depósitos morénicos), articulando a sua génese com a estrutura geológica e o substrato litológico; (ii) Discutir a reconstrução paleoglacial da Serra da Peneda no Pleistocénico Superior (extensão máxima dos gelos, dinâmica das frentes e áreas de acumulação e ablação);(iii) Desenvolver uma leitura integrada da paisagem, evidenciando as interações entre os legados glaciários, a dinâmica morfogenética atual e os padrões de ocupação antrópica.

No âmbito do congresso realizou-se ainda a entrega da **2.ª edição do Prémio António de Brum Ferreira**, distinção que visa reconhecer e incentivar a excelência na investigação nacional, premiando as melhores teses de doutoramento no domínio da geomorfologia.

A Comissão Organizadora e a Direção da APGEOM expressam o seu reconhecimento a todas as entidades e colaboradores que tornaram possível esta edição, com especial destaque para a **Faculdade de Letras da Universidade do Porto**, o **Centro de Estudos em Geografia e Ordenamento do Território (CEGOT)**, os membros da **Comissão Científica** e os **estudantes voluntários** do Departamento de Geografia da FLUP.

O XI Congresso Nacional de Geomorfologia reafirma-se, assim, como um marco no intercâmbio de conhecimento entre investigadores, técnicos e agentes de decisão, promovendo novas abordagens científicas e metodológicas orientadas para a edificação de territórios mais seguros, resilientes e sustentáveis.

A Comissão Organizadora,

José Teixeira, Marcelo Fernandes, Paulo Pereira, Raquel Melo e Susana Pereira.

Capítulo I - Geomorfologia Cársica

Using river long profile analysis to support more informative geotouristic routes: the case of “Gravina di Castellaneta” fluviokarst canyon (southern Italy)

Utilização da análise do perfil longitudinal do rio para apoiar percursos geoturísticos mais informativos: o caso do cânhão fluviocársico “Gravina di Castellaneta” (sul de Itália)

V. Venezia^{1*}, L. A. Dimuccio², L. Sabato¹, M. Tropeano¹

¹ University of Bari “Aldo Moro”, Department of Earth and Geoenvironmental Sciences, Bari, Italy

² University of Coimbra, CEGOT, Department of Geography and Tourism, Coimbra, Portugal

* vitantonio.venezia@uniba.it

ABSTRACT

Longitudinal profile and χ -analysis of the Gravina di Castellaneta fluviokarst canyon, in the Puglia region (southern Italy), reveal two relict equilibrium phases and associated paleo-profiles. The older is linked to a Middle Pleistocene marine terrace (base level), whereas the younger reflects lithological control and canyon incision. Knickpoints distribution indicates mixed forcing. Results can enrich geotourism routes, offering a dynamic view of relief evolution over time.

Keywords: *geomorphometry; χ -plot; paleo-long profiles; knickpoints; relief evolution; geodiversity promotion*

Palavras-chave: *geomorfometria; χ -plot; paleo-perfis longitudinais; ruturas de declive; evolução do relevo; promoção da geodiversidade*

1. INTRODUCTION

Within natural landscapes protected under various frameworks—such as national parks, geoparks, and the Natura 2000 Network—the promotion of geodiversity for geotourism has grown markedly in recent years. This expansion is evident in the increasing development of thematic routes that guide visitors through selected geosites and other key points of interest, promoting structured approaches to interpreting geodiversity (Dowling, 2013). However, despite the proliferation of studies focused on the characterisation and assessment of the scientific, educational, and touristic value of geodiversity elements (Pasquarè Mariotto et al., 2023), one of the most challenging aspects to communicate remains the portrayal of the evolution of relief. Indeed, beyond specialist audiences, the concept of “deep time” is often poorly understood (Aubry, 2009), and reliefs are commonly perceived as static rather than dynamic systems. Bridging this gap requires integrating scientifically robust yet accessible interpretative content into geotouristic routes, enhancing communication of processes and temporal scales, and fostering a deeper understanding of relief evolution and Earth’s surface dynamics.

Southern Italy, particularly the northwestern sector of the Taranto Gulf coastal area between the Apulia and Basilicata regions, provides a relevant setting for addressing these challenges. Here, the “Terra delle Gravine” Regional Park is characterised by a dense network of deeply incised fluviokarst

valleys, locally known as “*gravine*”, many of which display canyon-like morphologies (Fig. 1). Although the origin of these incised landforms remains debated (e.g., Boenzi, 2004; Mastronuzzi & Sansò, 2002), and regional morphometric analyses have already been conducted (Donnalioia et al., 2019), their application to geotourism-oriented interpretation remains innovative. These landforms, owing to their high scientific, educational, and touristic value, represent an important resource that requires effective communication and valorisation. Integrating quantitative and semi-quantitative geomorphological approaches can enhance existing itineraries and support the development of more informative routes, thereby strengthening strategies for geodiversity promotion and conservation. Accordingly, this study explores the potential of river long-profile reconstruction as a robust and reliable approach for improving the understanding of local/regional relief evolution. The insights derived are then used to support the design of more informative geotourism routes, with the Gravina di Castellaneta fluviokarst canyon serving as a case study.

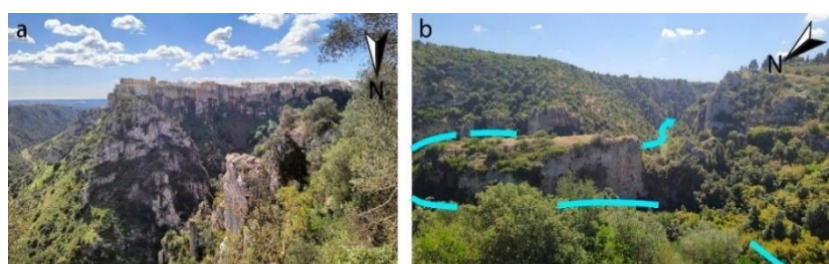


Figure 1. (a) View of the Gravina di Castellaneta fluviokarst canyon and (b) an example of an incised meander along its course (pale blue arrow indicates the direction of the stream).

2. GEOLOGICAL AND GEOMORPHOLOGICAL SETTING

The Gravina di Castellaneta drainage basin extends predominantly along a N–S axis (Fig. 2). Its main trunk originates on the Murge Plateau, a morpho-structural high formed by Cretaceous carbonate successions (limestones and dolostones) of the Apulia Carbonate Platform (D’Argenio, 1974).

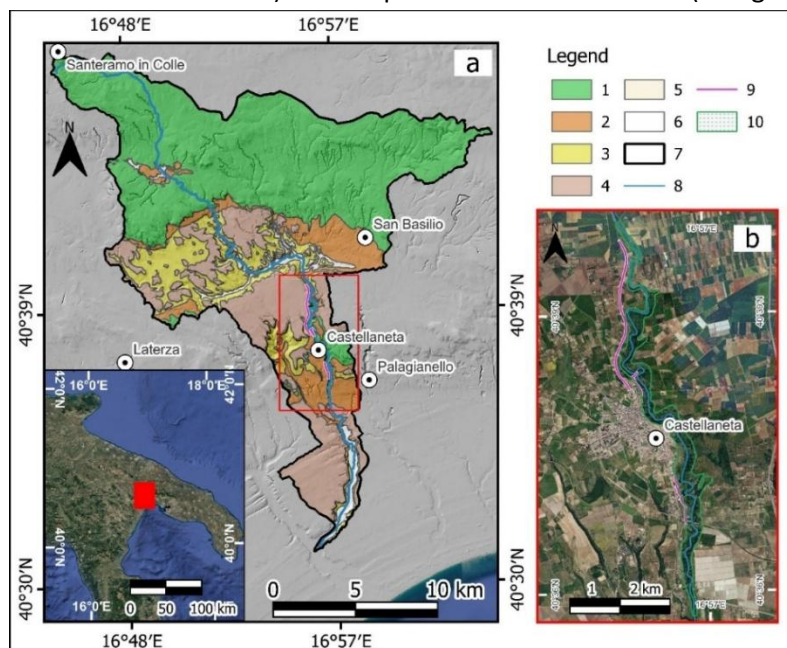


Figure 2. (a) Location of the Gravina di Castellaneta drainage basin and simplified lithological map (from Servizio Geologico d’Italia). (b) Satellite view of the fluviokarst canyon. (1) Cretaceous limestones and dolostones; (2) Plio–Pleistocene calcarenites; (3) Plio–Pleistocene clays; (4) Middle–Late Pleistocene marine terrace deposits; (5) Holocene sandy and

gravelly alluvial deposits; (6) Holocene silty and clayey alluvial deposits; (7) watershed boundary; (8) main trunk stream; (9) existing geotourism itineraries; (10) fluvio karst canyon boundaries.

The Murge constitutes the foreland of the southern Apennine Chain and underwent significant deformation during the Late Pliocene–Early Pleistocene, when flexural folding affected its western margin in response to the eastward migration of the orogenic front. This process led to regional subsidence, accompanied by the development of normal fault systems and westward-tilted fault blocks arranged in a domino-style configuration (Festa, 2003). In the central sector of the study area (Fig. 2), Plio–Pleistocene bioclastic calcarenites and offshore clays crop out, recording the progressive subsidence of the western side of the Murge foreland, which became a foreland-basin, locally referred to as the Bradanic Trough (Tropeano et al., 2002; and references therein). Further downstream, in the southernmost sector, the main trunk incises a staircase of Middle to Upper Quaternary marine terraces (Ricchetti, 1965; Boenzi et al., 1976), which document the most recent foreland-basin evolution, marked by a shift from subsidence to regional uplift (Doglioni et al., 1996). The primary geomorphological features of the Gravina di Castellaneta drainage basin are largely controlled by this phase of regional uplift. Specifically: (i) the Murge Plateau, forming the basin’s northern (uppermost) sector and remaining persistently subaerial even during flexural subsidence, reached its present elevation; (ii) in the central sector, progressive base-level lowering increased the erosional efficiency of the main channel, driving incision into both the Plio–Pleistocene foreland-basin succession and the underlying Cretaceous carbonate substrate, ultimately leading to the development of locally fluvio karst canyons; and (iii) in the southern (lowermost) sector, the combined influence of regional uplift and eustatic sea-level fluctuations governed the formation of a staircase of marine terraces.

3. METODOLOGY

A 5 × 5 m digital elevation model (DEM) was generated by integrating contour lines, elevation points, streams, and lakes from vector datasets provided by the S.I.T. Puglia geoportal (<https://pugliacon.regione.puglia.it/web/sit-puglia-sit>; last accessed 22 January 2026). All spatial processing and cartographic outputs were produced using QGIS (v. 3.34.7). In GIS, the Gravina di Castellaneta drainage basin was identified and delineated (Fig. 2). River long-profile analysis was then applied to the main trunk stream to investigate longitudinal channel adjustment and to infer spatial patterns of incision, transient disequilibrium, and potential tectonic or lithological controls. The analysis was performed in MATLAB using the χ -transformation implemented with the TopoToolbox package (Schwanghart & Scherler, 2014), following established geomorphological frameworks (e.g., Whipple & Tucker, 1999; Perron & Royden, 2013). The χ -transformation reformulates the traditional longitudinal river profile by replacing downstream distance with the χ coordinate, defined as:

$$\chi = \int_{x_b}^x \left(\frac{A_0}{A(x)} \right)^\theta dx \quad [1]$$

where x_b is the channel outlet, x is a point along the channel, A_0 is a reference drainage area, $A(x)$ is the upstream drainage area at x , and θ is the concavity index.

In χ -elevation space, the channel profile can be expressed as:

$$z(x) = z_b + A_0^{-\theta} k_s \chi \quad [2]$$

where $z(x)$ is the channel elevation, z_b is the base-level elevation, and k_s is the steepness index (commonly expressed as k_{sn} when θ is normalised to 0.45). Assuming $A_0 = 1 \text{ m}^2$, a steady-state river incising into homogeneous lithology under spatially uniform uplift is expected to plot as a linear relationship in χ -space, with slope proportional to k_s (Perron & Royden, 2013; Giachetta & Willett,

2018). Deviations from linearity, therefore, indicate spatial adjustments in channel gradient associated with lithologic contrasts, base-level perturbations, or transient geomorphic responses.

Based on this framework, χ -plots and k_{sn} values were computed using $A_0 = 1 \text{ m}^2$ and $\theta = 0.45$. Linear segments of the χ -elevation profile were interpreted as quasi-equilibrium reaches, whereas slope changes and inflexions were identified as knickpoints. These knickpoints were further classified as vertical-step or slope-break types, following Haviv et al. (2018) and Kirby & Whipple (2012), thereby distinguishing sharp transient discontinuities from more diffuse gradient adjustments. Relict equilibrium segments were extracted from the χ -plot and used to reconstruct paleo-long profiles corresponding to inferred steady-state conditions. These reconstructions were then compared with spatial patterns of bedrock lithology and structural discontinuities (faults and joints), to assess potential litho-structural controls on channel form and incision dynamics.

This integrated methodology provides a geomorphological framework for identifying key knickpoints and geological discontinuities that can be translated into interpretative geotourism nodes along the studied fluviokarst canyon. Moreover, the reconstruction of paleo-long profiles introduces a temporal dimension to the geomorphological narrative, enabling geotouristic routes to move beyond purely spatial descriptions of the relief and to incorporate its progressive evolution through time.

4. RESULTS AND INTERPRETATION

Figure 3 synthesizes the results obtained through the integrated methodological framework. The χ -plot reveals two well-defined linear segments, supported by relatively uniform k_{sn} values (Fig. 3b), which are interpreted as distinct phases of dynamic equilibrium in the evolution of the longitudinal profile of the main trunk stream of the Gravina di Castellaneta drainage basin. The upstream segment represents an older equilibrium state, whereas the downstream one reflects a more recent adjustment (rejuvenation). Both segments were projected to reconstruct the corresponding paleo-long profiles of the main trunk stream (red dashed lines in Fig. 3a).

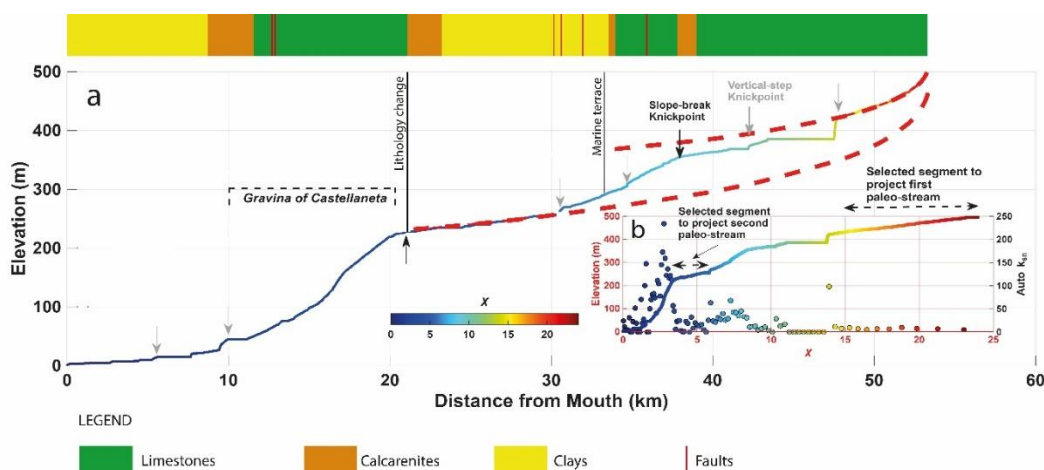


Figure 3. (a) Reconstructed longitudinal profile of the main trunk stream of the Gravina di Castellaneta drainage basin, showing the distribution of slope discontinuities (knickpoints), identified through visual inspection and supported by k_{sn} values. Grey vertical arrows mark vertical-step knickpoints, whereas black arrows indicate slope-break knickpoints. The coloured bar above the plot depicts bedrock lithology and fracture distribution along the profile. Red dashed lines represent potential relict paleo-long profiles automatically derived from χ -analysis (b) (more details in the text).

The integration of the longitudinal profile with the lithological framework highlights a Middle Pleistocene marine terrace composed of calcareous detritus, mainly shell fragments and rounded

gravels (Ricchetti, 1965; Azzaroli et al., 1968), located approximately 35 km from the stream mouth and reaching elevations of up to ~320 m a.s.l. (Figs. 2 and 3). The top of this depositional surface is interpreted as the paleo-base level (i.e., sea level) associated with the older equilibrium profile. In contrast, the younger paleo-profile terminates at the onset of incision of the Gravina di Castellaneta fluviokarst canyon (~20 km from the mouth), marking a subsequent phase of base-level lowering (Figs. 2 and 3). Further downstream, the first terrace intersected by this younger profile occurs at ~15 km from the mouth, at ~190 m a.s.l.; however, its considerable distance from the inferred equilibrium tip precludes its interpretation as a corresponding base level. Instead, the associated break in equilibrium is more plausibly linked to lithological forcing, namely the transition from relatively erodible Plio–Pleistocene foreland-basin succession to more resistant Cretaceous limestones and dolostones. Along the reconstructed longitudinal profile, two slope-break knickpoints and six vertical-step knickpoints were identified. Comparison with the geology of the study area indicates that some knickpoints spatially coincide with lithological boundaries or mapped fractures, whereas others show no clear correspondence (Fig. 3a). This variability suggests a combined influence of lithological/structural controls and transient geomorphic processes, underscoring the need for targeted field verification to robustly constrain their origin. Building on this reconstruction of the drainage basin’s evolutionary history, sites where key geological and geomorphological features are particularly well expressed—and directly linked to the identified evolutionary stages—can be selected as anchor points for a geotouristic itinerary. This approach would enable visitors to perceive and interpret the temporal evolution of the Gravina’s relief, translating complex geomorphological dynamics into an accessible and coherent narrative of environmental change.

5. FINAL REMARKS

The longitudinal profile analysis of the Gravina di Castellaneta trunk stream (southern Italy), supported by χ -plot and k_{sn} metrics, reveals a complex evolutionary history marked by alternating phases of dynamic equilibrium and transient adjustment. Two relict equilibrium states were identified and used to reconstruct corresponding paleo-long profiles. The older profile is robustly constrained by correlation with the oldest marine terrace of the analyzed area, interpreted as its paleo-base level, whereas the younger equilibrium surface is truncated by the incision of a fluviokarst canyon and appears primarily controlled by lithological contrasts rather than base-level change. The distribution of eight knickpoints, variably associated with lithological boundaries and structural elements, further highlights the combined influence of external forcing and intrinsic controls on channel adjustment. However, the partial mismatch between morphometric signals and geological features emphasises the need for systematic field validation to refine process interpretations. These results provide a solid framework for guiding targeted field investigations and for identifying key sites that effectively capture the main stages of relief evolution. Such sites form the basis for developing a scientifically grounded geotouristic itinerary that conveys the dynamic nature of the Gravina’s landforms. Extending the same analytical approach to the remaining drainage basins within the “Terra delle Gravine” Regional Park will enable the definition of a broader, integrated geotourism network that links the most representative geosites into a coherent interpretative pathway at the regional scale.

Acknowledgements

This research was supported by the “Corso di Dottorato di Interesse Nazionale in Earth Processes and Management of Resources and Risks for a Resilient Society and Territory (Cycle XXXIX)”, hosted by the Department of Earth and Geoenvironmental Sciences at the University of Bari (Italy). Additional

support was provided by the Centre of Studies in Geography and Spatial Planning (CEGOT), funded by the Portuguese Foundation for Science and Technology (FCT) under project reference UIDB/04084/2025.

References

- Aubry, M.P. (2009). Thinking of deep time, *Stratigraphy* 6, 93–9.
- D’Argenio, B. (1974). Le piattaforme periadriatiche. Una rassegna di problemi nel quadro geodinamico mesozoico dell’area del Mediterraneo. *Memorie della Società Geologica Italiana*, 13.
- Azzaroli A., Radina B., Ricchetti G. & Valduga A. (1968). Nota illustrativa della Carta geologica d’Italia alla scala 1:100000, foglio 189 “Altamura”. Min. Ind. Comm. e Artig., Servizio Geologico d’Italia.
- Boenzi, F., Palmentola, G. & Valduga, A. (1976). Caratteri geomorfologici dell’area del Foglio “Matera”. *Bollettino della Società Geologica Italiana* 95, 527–566.
- Dogliani, C., Tropeano, M., Mongelli, F. & Pieri, P. (1996). Middle-late Pleistocene uplift of Puglia: an "anomaly" in the Apenninic foreland. *Memorie della Società Geologica Italiana* 51, 101–117.
- Donnalioia, M., Giachetta, E., Capolongo, D., Pennetta, L. (2019). Evolution of fluviokarst canyons in response to the Quaternary tectonic uplift of the Apulia Carbonate Platform (southern Italy): Insights from morphometric analysis of drainage basins. *Geomorphology*, 336, 18–30.
- Dowling, R.K. (2013). Global Geotourism – An Emerging Form of Sustainable Tourism. *Czech Journal of Tourism*, 2(2), 59–79.
- Festa, V. (2003). Cretaceous Structural Features of the Murge Area (Apulian Foreland, Southern Italy). *Ecol. Geol. Helv.* 96, 11–22.
- Giachetta, E. & Willett, S.D. (2018). A global dataset of river network geometry. *Scientific data* 5, 180127.
- Haviv, I., Enzel, Y., Whipple, K.X., Zilberman, E., Matmon, A., Stone, J., Fifield, K.L. (2010). Evolution of vertical knickpoints (waterfalls) with resistant caprock: Insights from numerical modelling. *J. Geophys. Res.* 115, F03028.
- Kirby, E. & Whipple, K. X. (2012). Expression of active tectonics in erosional landscapes. *J Struct Geol* 44, 54–75.
- Mastronuzzi, G. & Sansò, P. (2002). Pleistocene sea-level changes, sapping processes and development of valley networks in the Apulia region (southern Italy). *Geomorphology* 46, 19–34.
- Pasquaré Mariotto, F., Drymoni, K., Bonali, F.L., Tibaldi, A., Corti, N., & Oppizzi, P. (2023). Geosite Assessment and Communication: A Review. *Resources* 12(2), 29.
- Perron, J. & Royden, L. (2013). An integral approach to bedrock river profile analysis. *Earth Surf. Process. Land.* 38, 570–576.
- Ricchetti, G. (1965). Alcune osservazioni sulla serie della Fossa Bradanica. Le “Calcareni di M. Castiglione”. *Bollettino della Società Naturalisti in Napoli* 74, 3–11.
- Schwanghart, W. & Scherler, D. (2014). TopoToolbox 2 – MATLAB-based software for topographic analysis and modelling in Earth surface sciences. *Earth Surface Dynamics* 2, 1–7.
- Tropeano, M., Sabato, L. & Pieri, P. (2002). Filling and cannibalization of a foredeep: the Bradanic Trough, Southern Italy. *Geol. Soc. Lond., Spec. Publ.* 191 (1), 55–79.
- Whipple, K.X. & Tucker, G.E. (1999). Dynamics of the stream-power river incision model: implications for height limits of mountain ranges, landscape response timescales and research needs. *J. Geophys. Res.* 104 (B8), 17661–17674.

CT-TreeFlow (Conditional Tree-Based Flow): A Spatially Adaptive Probabilistic Framework for Groundwater Potential Mapping with Quantified Uncertainty in Karst Aquifers

CT-TreeFlow (Fluxo Condicional Baseado em Árvores): Um quadro probabilístico espacialmente adaptativo para o mapeamento do potencial de águas subterrâneas com quantificação da incerteza em aquíferos cársticos

S. Pourmorad^{1*}, M. Kabolizade², R. Ferreira¹, L. A. Dimuccio¹

¹ University of Coimbra, CEGOT, Department of Geography and Tourism, FLUC, Coimbra, Portugal

² Shahid Chamran University of Ahvaz, Department of Remote Sensing and GIS, Faculty of Earth Sciences, Iran

* omid2red@gmail.com omid2red@gmail.com

ABSTRACT

Groundwater potential mapping in karst systems is inherently uncertain because of pronounced spatial heterogeneity. Using Khuzestan Province (southwest Iran) as a case study, a predictive groundwater potential map was developed with the CTBF framework. This spatially adaptive probabilistic approach overcomes the limitations of deterministic methods by learning location-specific predictive distributions through tree-based partitioning and flow-based density estimation.

Keywords: karst aquifers; machine learning; predictive modelling; uncertainty quantification; groundwater potential map

Palavras-chave: aquíferos cársticos; aprendizagem de máquina; modelação preditiva; quantificação da incerteza; mapa do potencial de águas subterrâneas

1. INTRODUÇÃO

Groundwater potential mapping in karst aquifers remains a critical yet inherently complex problem, driven by pronounced spatial heterogeneity arising from fracture networks, dissolution processes, and structural controls (De Waele & Gutiérrez, 2022). In tectonically active regions such as the Zagros Fold-and-Thrust Belt in Iran, deformation structures further complicate groundwater flow pathways and storage, resulting in highly non-uniform aquifer behaviour (Alavi, 2007). These conditions challenge the reliability of conventional hydrogeological approaches and motivate the adoption of advanced data-driven modelling strategies. Machine learning (ML) methods have demonstrated strong capability in capturing nonlinear relationships between environmental predictors and groundwater occurrence (Chen et al., 2020; Avand et al., 2020; Guo et al., 2023). Tree-based algorithms such as Random Forest (RF) and gradient boosting frameworks (e.g., XGBoost and LightGBM) have achieved high predictive accuracy and robustness in geospatial applications (Chen & Guestrin, 2016). However, despite their predictive success, these approaches typically produce point estimates and lack an explicit

representation of predictive uncertainty, which is intrinsic to groundwater systems in karst environments (Rajaei et al., 2019). Furthermore, commonly used validation strategies often neglect spatial dependence, leading to overestimated model performance and limited generalisability (Roberts et al., 2017).

To address these limitations, this study introduces an innovative conditional tree-based flow (CTBF), a probabilistic, ML-based framework that integrates hierarchical tree-based partitioning with predictive distribution modelling to explicitly represent uncertainty in groundwater potential mapping. Unlike conventional models, CTBF learns full conditional predictive distributions, enabling simultaneous characterisation of expected groundwater potential and its associated uncertainty while preserving the nonlinear modelling strength of tree-based methods. The objectives of this study are to: (i) develop the CTBF framework for probabilistic groundwater potential mapping; (ii) evaluate its predictive performance and the reliability of its uncertainty estimates using spatial cross-validation and statistical metrics; (iii) compare its performance with benchmark models, including LightGBM and XGBoost; and (iv) investigate the hydrogeological relevance of environmental predictors and spatial prediction patterns in karst aquifers.

2. STUDY AREA

The study area lies in Khuzestan Province, south-western Iran, within the Zagros Fold-and-Thrust Belt, a tectonically active region formed by the convergence of the Arabian and Eurasian plates (Alavi, 2007). Structurally, the area is characterised by folded and faulted carbonate formations, with fractures and faults strongly controlling groundwater flow and karst development (Casciello et al., 2009). The spatial distribution of geological units and karst springs used for validation is shown in Figure 1. Hydrogeologically, the region comprises a heterogeneous system of aquifers and aquitards. The Asmari Formation is the main karst aquifer due to its high permeability, whereas evaporitic units, such as the Gachsaran Formation, act as confining layers (Fijani et al., 2021). The interplay of tectonics, lithology, and geomorphology produces highly variable recharge and flow conditions, making the area suitable for groundwater potential modelling.

3. METHODOLOGY

An integrated ML-based framework was developed to model groundwater potential in a karst environment. The problem was formulated as a continuous spatial prediction, using a proxy informed by presence–pseudo-absence data and modelled as its conditional distribution given environmental predictors derived from a geographic information system (GIS) and remote sensing. A harmonised database at a 30 m spatial resolution combined topographic, geological, hydrological, climatic, and land-cover variables. Multicollinearity was reduced by removing predictors with $|r| > 0.80$. Target presence data were derived from mapped springs and caves, while pseudo-absences were generated using a distance-constrained random approach to limit spatial bias. Model performance was assessed using spatial k-fold cross-validation with contiguous blocks to minimise autocorrelation. CTBF was implemented alongside LightGBM and XGBoost. Unlike benchmark models, CTBF estimates the full conditional distribution, enabling explicit, location-specific uncertainty quantification. Performance was evaluated using RMSE, MAE, and R^2 , complemented by probabilistic metrics (CRPS and calibration) to assess reliability. Ensemble averaging was applied to enhance robustness. Predictions were ultimately classified into five groundwater potential classes for practical interpretation and management.

4. MAIN RESULTS AND DISCUSSION

Under spatial cross-validation, CTBF consistently outperformed the benchmark models, achieving lower RMSE and MAE and higher R^2 than LightGBM and XGBoost across all folds. Beyond accuracy gains, it produced probabilistic predictions with well-calibrated uncertainty estimates, as evidenced by improved CRPS scores and reliable calibration diagnostics. Permutation-based importance analysis identified drainage density, fracture density, and NDVI as the most influential variables, underscoring the key role of structural controls and surface conditions in the occurrence of karst groundwater. Spatially, high-potential areas cluster within structurally controlled carbonate units and align closely with mapped springs and cave entrance locations, reinforcing the hydrogeological plausibility of the results. Overall, CTBF enables joint representation of groundwater potential and uncertainty, offering a more informative and physically consistent alternative to conventional deterministic approaches and providing a robust framework for karst aquifer assessment.

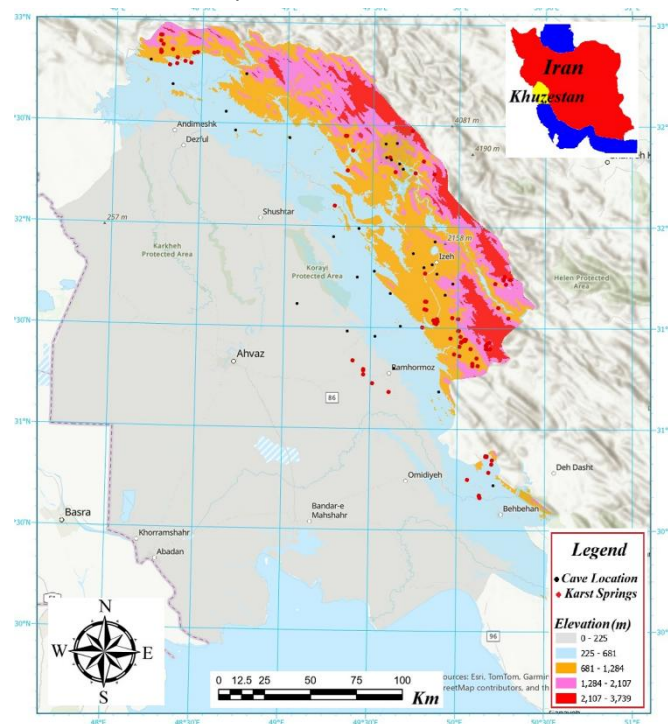


Figure 1. Location and topography of the study area (Khuzestan Province, southwest Iran), illustrating the transition from low-lying alluvial plains to the elevated relief of the Zagros Mountains. Black dots denote mapped cave entrance locations, while red dots indicate karst springs.

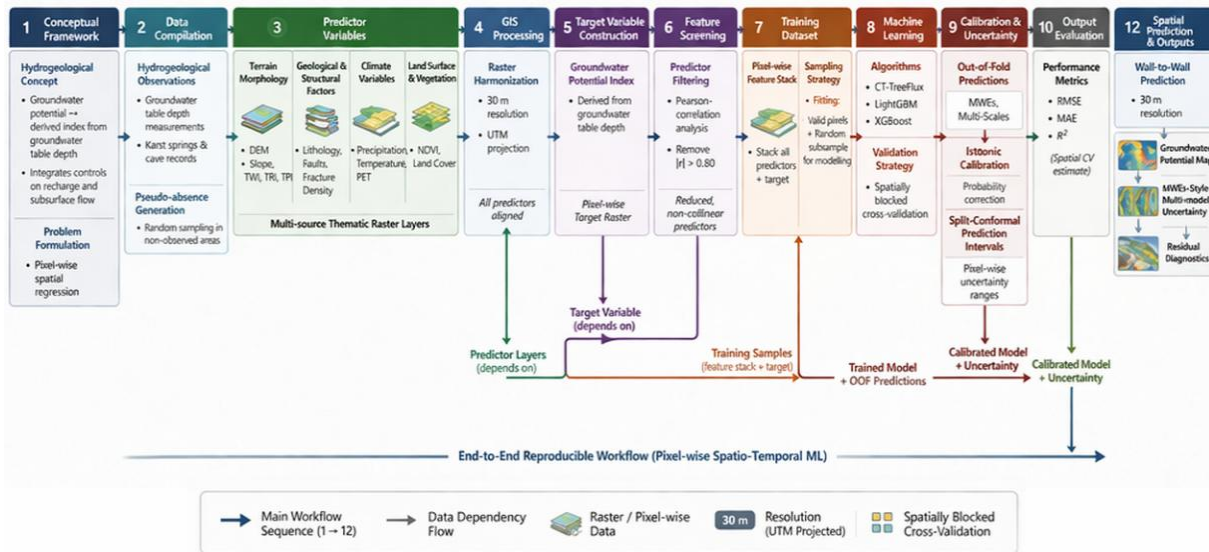


Figure 2. Conceptual workflow for groundwater potential modelling, outlining the sequence from data preparation and feature construction to ML implementation, uncertainty quantification, and spatial prediction.

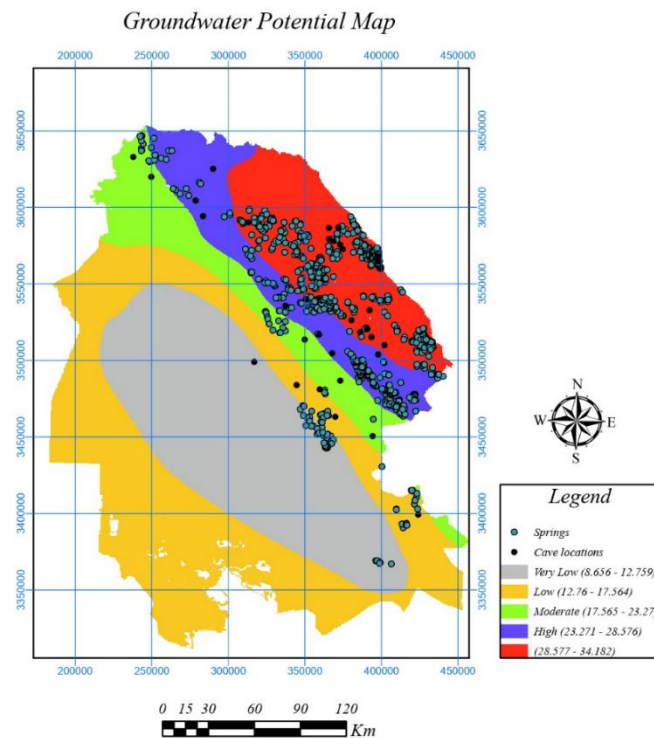


Figure 3. Groundwater potential map for the study area generated by the CTBF modelling approach, with mapped karst springs (blue) and cave entrance locations (black) overlaid to support visual validation and hydrogeological interpretation.

4. CONCLUSIONS

This study introduces CTBF, a probabilistic framework for groundwater potential mapping that explicitly captures spatially variable uncertainty through learned conditional predictive distributions. The results demonstrate improved predictive performance and well-calibrated probabilistic outputs, as evidenced by probabilistic evaluation metrics, enabling a more reliable characterisation of groundwater potential and its associated uncertainty. The predicted spatial patterns align with established hydrogeological controls, including carbonate formations, structural features, and geomorphological conditions,

supporting the model's physical plausibility. By jointly modelling prediction and uncertainty, the proposed approach advances beyond conventional deterministic frameworks by providing spatially explicit uncertainty information alongside predictive estimates. Overall, CTBF provides a robust and applicable framework for groundwater potential analysis in complex karst systems. Future work will focus on extending the framework to incorporate temporal dynamics and multi-scale data, further improving predictive capability and uncertainty representation.

Acknowledgements

This research was supported by the Centre of Studies in Geography and Spatial Planning (CEGOT), funded by national funds through the Foundation for Science and Technology (FCT) under references UIDB/04084/2025 and UIDP/04084/2025. The first author is supported by a PhD grant from FCT under reference UI/BD/154881/2023 (<https://doi.org/10.54499/UI/BD/154881/2023>).

References

- Alavi, M. (2007). Structures of the Zagros fold–thrust belt in Iran. *American Journal of Science*, 307(9), 1064–1095.
- Avand, M., Janizadeh, S., Bui, D. T., Pham, V. H., Ngo, P. T. T., & Nhu, V.-H. (2020). A tree-based intelligence ensemble approach for spatial prediction of potential groundwater. *International Journal of Digital Earth*, 13(12), 1408–1429.
- Casciello, E., Vergés, J., Saura, E., Casini, G., Fernández, N., & Blanc, E. (2009). Fold patterns and multilayer rheology of the Lurestan Province, Zagros Simply Folded Belt (Iran). *Journal of the Geological Society*, 166(5), 947–959.
- Chen, T., & Guestrin, C. (2016). XGBoost: A scalable tree boosting system. *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, 785–794.
- Chen, W., Zhao, X., Tsangaratos, P., Shahabi, H., Ilia, I., Xue, W., Wang, X., & Ahmad, B. B. (2020). Evaluating the usage of tree-based ensemble methods in groundwater spring potential mapping. *Journal of Hydrology*, 583, 124602.
- De Waele, J., & Gutiérrez, F. (2022). *Karst hydrogeology, geomorphology and caves*. Wiley.
- Guo, X., Gui, X., Xiong, H., Hu, X., Li, Y., Qiu, Y., & Ma, C. (2023). Critical role of climate factors for groundwater potential mapping in arid regions: Insights from random forest, XGBoost, and LightGBM algorithms. *Journal of Hydrology*, 620, 129840.
- Fijani, E., Bagheri, R., & Karimi-Vardanjani, M. (2021). Prospectivity modeling of karstic groundwater in the southeast of Iran. *Geopersia*, 11(1), 141–158.
- Rajaei, T., Ebrahimi, H., & Nourani, V. (2019). A review of the artificial intelligence methods in groundwater level modeling. *Journal of Hydrology*, 572, 336–351.
- Roberts, D. R., Bahn, V., Ciuti, S., Boyce, M. S., Elith, J., Guillerá-Aroita, G., ... Dormann, C. F. (2017). Cross-validation strategies for data with temporal, spatial, hierarchical, or phylogenetic structure. *Ecography*, 40(8), 913–929.

Cave rocky relief features indicative of a possible hypogenic origin of Lapa das Almoinhas (Leiria, central Portugal): preliminary insights

Formas de erosão nas condutas apontam para uma possível origem hipogénica da Lapa das Almoinhas (Leiria, Portugal central): resultados preliminares

L. A. Dimuccio^{1*}, D. Amaral^{2,3}

¹ University of Coimbra, CEGOT, Department of Geography and Tourism, Coimbra, Portugal

² University of Coimbra, Department of Geography and Tourism, Coimbra, Portugal

³ Núcleo de Espeleologia de Leiria (NEL), Leiria, Portugal

* luca@ci.uc.pt

ABSTRACT

The Lapa das Almoinhas cave records karst development in a diapir-influenced setting (central Portugal). Its geometry, weak structural control, cave's internal morphologies, and regional hydrogeological context suggest hypogenic speleogenesis driven by ascending H₂S-rich fluids under water-table conditions, subsequently overprinted by epigenic processes. These results support a polygenetic framework in which speleogenesis reflects cumulative, temporally distinct yet dynamically linked processes.

Keywords: karst; Leiria–Parceiros diapir; evaporitic marls; thermal-mineralised fluids; cave morphologies; speleogenesis

Palavras-chave: carso; diapiro de Leiria-Parceiros; margas evaporíticas; fluidos termo-mineralizados; morfologias de gruta; espeleogénese

1. INTRODUCTION

Karst terrain develops when chemical dissolution of soluble rocks, alongside other weathering processes, plays a guiding role in shaping its landforms. This is a distinctive geomorphic system characterised by two subsystems: the surface and the subsurface, which are directly or indirectly interconnected. The latter is often difficult to access and is characterised by solution caves of varying sizes and degrees of complexity (Ford & Williams, 2007; Palmer, 2007; De Waele & Gutierrez, 2022). The inherent nature of karst—marked by an underground landscape—alongside diverse groundwater flow patterns and segments characterised by distinct hydrodynamic, geochemical, and hydrothermal conditions, allows the recognition of two main types of speleogenesis (i.e., the formation of solution-caves) (Ford & Williams, 2007; Palmer, 2007; Klimchouk, 2007): (1) hypogenic, related to stratified hydrogeological systems at different depths and degrees of confinement, including fracture-controlled flow systems that act as conduits between permeable and impermeable layers; and (2) epigenic, associated with hydrodynamically open, unconfined systems. Within the framework of Cigna's (1978) “hyperkarst” concept, hypogenic karstification involves ascending fluids—typically thermal or undersaturated—whose aggressiveness is often linked to CO₂ or H₂S enrichment. This may result from interactions with volcanic gases or evaporitic rocks, the decomposition of organic matter, or sulphide oxidation. The resulting corrosion–dissolution processes give rise to distinctive cave patterns, including

anastomotic, spongework, ramiform, isolated, and blind-side conduit systems (Palmer, 2007, 2013). These systems are characterised by diagnostic morphologies sculpted into the cave floor, walls, and roof—such as discharge feeders, rising channels, replacement pockets, etc. (speleogens; Klimchouk, 2007; De Waele & Gutierrez, 2022). They are further associated with secondary mineralisations interpreted as speleogenetic by-products, comprising saccharoidal gypsum, native sulphur, and minerals of the alunite group (Polyak & Provencio, 2001), which are clearly distinct from epigenic features produced by meteoric seepage waters (Ford & Williams, 2007). Hypogenic caves are typically characterised by the absence of a functional hydrological connection to the surface and by the lack of features indicative of turbulent flow within their conduits. Instead, these conduits reflect slow, buoyancy-driven or diffuse fluid circulation. Among the various hypogenic mechanisms, sulphuric acid speleogenesis (SAS) appears to be the most common (e.g., De Waele & Gutierrez, 2022).

In a previous study (Amaral et al., 2024), framed by this genetic duality and supported by regional lithostratigraphic, morphostructural, and hydrogeological constraints, sectors of the Western Meso-Cenozoic Border of Portugal with high potential for hypogenic speleogenesis were identified. These occurrences are predominantly associated with salt diapiric systems and their adjacent carbonate and evaporitic successions (Fig. 1A), where the interaction between deep-seated, thermal and/or highly mineralised groundwaters and structural discontinuities favours the upward migration of fluids through karstifiable rocks.

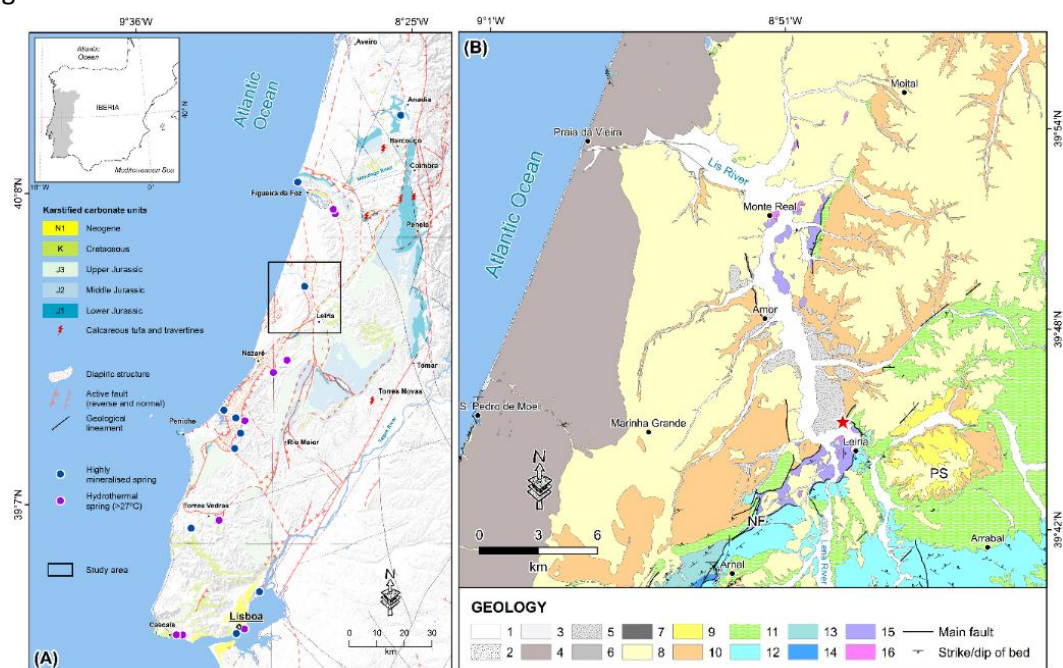


Figure 1. (A) Spatial distribution of the main outcrops of carbonate units affected by differential karstification in the Western Meso-Cenozoic Border of Portugal (from Amaral et al., 2024). (B) Geology of the Leiria region (based on Teixeira et al., 1968), and location of the studied cave entrance (red star). (1) Alluvial deposits - Holocene; (2) Beach sands - Holocene; (3) Slope deposits - Holocene; (4) Aeolian dunes and sands - Pleistocene to Holocene; (5) Fluvial terraces deposits - Pleistocene; (6) Calcareous tufa and travertines - Pleistocene; (7) Marine terraces deposits - Pleistocene; (8) Conglomerates, sands and clays - Pliocene; (9) Sandstone, clayey sandstones, conglomerates and clays - Miocene; (10) Clays, marls, clayey sandstones and conglomerates - Paleogene; (11) Conglomerates, sandstones and claystone with marl limestones, limestones and volcanic tufa - Cretaceous; (12) Clays and sandstones, marl limestones and conglomerates, limestones and marls - Upper Jurassic; (13) Limestones, marl limestones and marls - Middle Jurassic; (14) Marl limestones and marls, limestones, dolomitic limestones - Lower Jurassic; (15) Evaporitic marls and silty clays - Triassic-Hettangian; (16) Andesite, dolerite and basalt dikes/sills. NF = Nazaré Fault; PS = Pousos synclinal.

In the Leiria region (central Portugal), the Lapa das Almoinhas represents a well-constrained example of karstic cave development within a structurally complex, diapir-influenced sector of the Lusitanian Basin (Kullberg et al., 2013) (Fig. 1B). Discovered during the construction of the EN109 road in the 1990s, the cave entrance is situated along the northern structural boundary of the Leiria–Parceiros diapir, a halokinetic structure cored by Triassic–Hettangian evaporitic marls and silty clays. These ductile materials are flanked by intensely deformed Jurassic and Cretaceous carbonate successions, exhibiting NW-dipping strata ($>60^\circ$), locally reaching vertical or overturned attitudes (e.g., Teixeira et al., 1968). The proximity to a segment of the deep-seated Nazaré Fault system further emphasises the role of coupled tectonic and halokinetic processes in defining a highly heterogeneous permeability framework (Kullberg et al., 2013) (Fig. 1B). The main objective of this study is to characterise cave patterns and identify and interpret meso-scale erosional forms on the floor, walls, and roof of the conduits (i.e., cave rocky relief sensu Slabe, 1995). When considered alongside geological conditions, governing physicochemical processes, and the hydrological setting, these features may help elucidate hypogenic–epigenic speleogenesis. Accordingly, the study also aims to place the cave's origin and evolution within its broader morphostructural framework, with particular emphasis on subsurface fluid circulation and its relationship to diapiric and related geological structures.

2. METHODOLOGY

In this preliminary approach, the methodological workflow for the morphological characterisation of Lapa das Almoinhas comprised: (1) a detailed topographic survey and cave mapping to 6D classification (plan and cross-section views), following UIS standardisation guidelines (<https://www.uisic.uis-speleo.org/wgsurmap.html> - last access on March 2026), conducted with support from the Núcleo de Espeleologia de Leiria (NEL); (2) a systematic characterisation of cave morphology and erosional features within passages, complemented by high-resolution 3D digital documentation using a Leica BLK360 static imaging terrestrial laser scanner (estimated scan time of 1:15 minutes and a resolution of 6 mm at 10 m; maximum scanning frequency of 680,000 points per second); and (3) a regional geological and groundwater-flow characterisation based on the analysis of lithostratigraphic contacts and morphostructural features—including evaporitic diapiric systems—and the presence of associated hydrothermal and highly mineralised springs.

3. RESULTS

Morphologically, the studied cave exhibits an isolated spongework-to-ramiform pattern, characterised by a subhorizontal organisation of conduits and a very low-relief floor, with chambers much larger than the passages leading out of them. It extends to ~30 m, with a maximum ceiling height of ~2.5 m. Passages range from subcircular to elliptical in cross-section and terminate abruptly laterally (Fig. 2). The cave geometry is markedly discordant with the steeply dipping carbonate host strata (Fig. 3A), indicating that conduit development was largely decoupled from primary bedding-plane control. The cave conforms to a cut-strata configuration, with passages transecting stratification and lacking clear guidance from the fracture network. As shown in Figure 3B–G, the walls of the cave passages and main chambers display an overall smooth-to-undulating morphology, sculpted by solution pockets, rising channels, rock pendants, and other variable corrosion features, some of which are accentuated by red/yellow iron-rich mineral coatings or covered by diverse types of secondary carbonates (speleothems). Horizontal pseudo-notches occur locally in passages with elliptical cross-sections. Although no clear discharge feeders are immediately visible on the floor, both passage morphology and observations by the speleologists who surveyed the cave suggest their presence beneath a cover

of breakdown debris, likely mixed with surface-derived sediments and a relatively thick layer of dark bat guano. The cave's ceiling is characterised by rising blind chimneys, cupolas/domes, coalescent spherical cupolas, bell-holes, and sinuous channels.

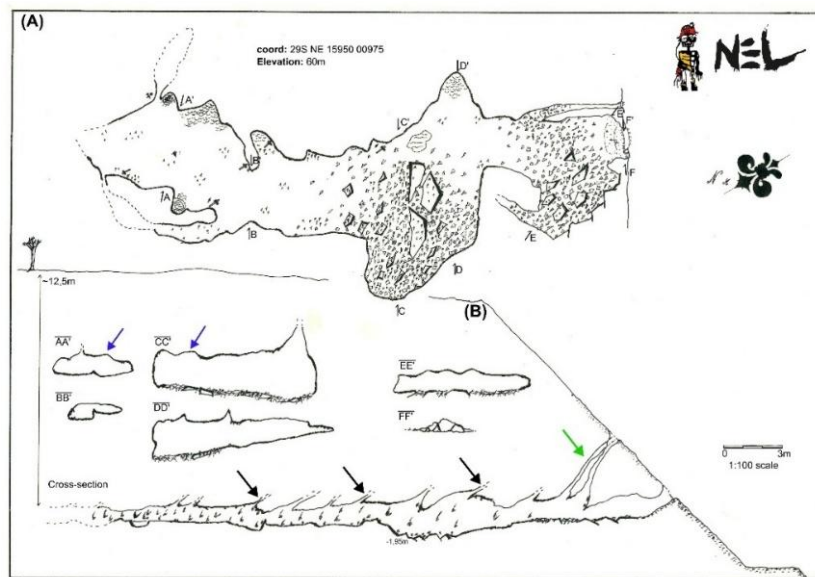


Figure 2. (A) Simplified plan view of the Lapa das Almoinhas cave. (B) Longitudinal and transverse cross-sections highlighting key vertical features: rising blind chimneys (black arrows) and ceiling cupolas (blue arrows). The green arrow indicates chimneys that intersect the topographic surface, forming secondary entrances to the cave.

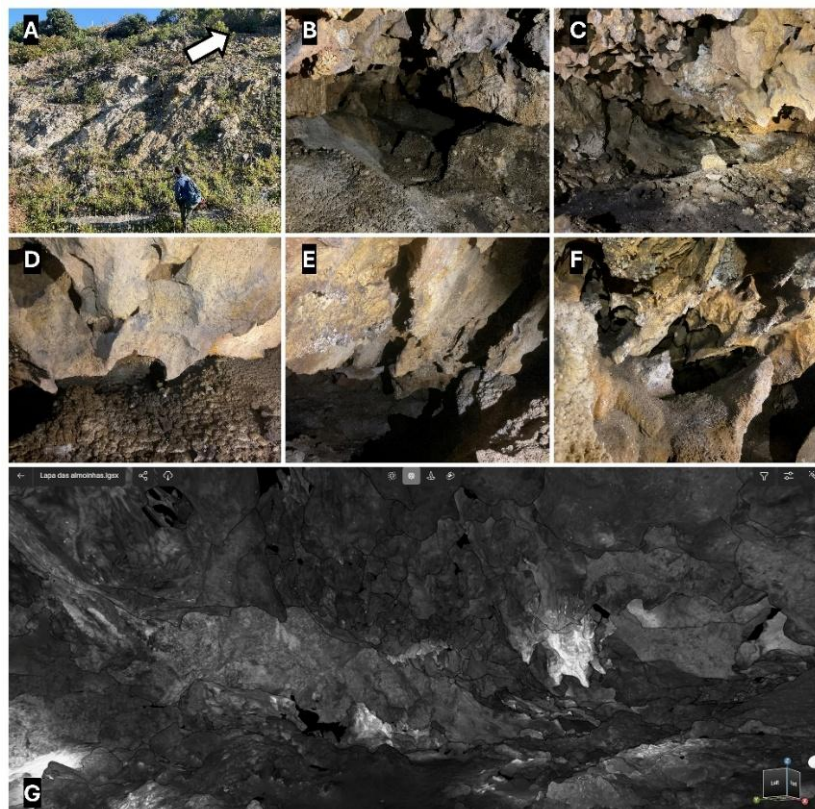


Figure 3. General view of the outcrop hosting the Lapa das Almoinhas, with representative examples of meso-scale morphologies observed within its conduits. (A) A strongly deformed carbonate succession along the northern flank of the Leiria-Parceiros diapir, characterised by NW-dipping strata ($>60^\circ$) that locally attain vertical attitudes; the white arrow marks the main cave entrance. (B) A passage with an elliptical cross-section, displaying horizontal pseudo-notches along the walls, rising blind chimneys, and a slot-like feeder partially obscured and infilled by breakdown debris, with dark bat guano, covering the floor. (C) Rock pendants, well-developed spongework along the ceiling (near a possible feeder), and dark bat

guano covering the floor. (D) Ascending channels, solution pockets, and rock pendants. (E) Bell holes and sinuous ceiling channels. (F) Examples of secondary carbonates coat the walls and ceiling surfaces. (G) Overview of the main chamber, reconstructed from a Leica BLK360 terrestrial laser-scanning point cloud.

4. INTERPRETATION

At this stage of the investigation, no diagnostic mineralogical indicators of SAS have yet been identified within the cave (e.g., alunite, jarosite, gypsum). Nevertheless, the observed cave patterns and overall geometry—characterised by predominantly subhorizontal passages and limited alignment with major structural elements—are compatible with development at or near water-table conditions within a SAS framework (*sensu* Palmer, 2013). While fissure (bedding planes and fractures) networks exert primary control over permeability, their influence on cave geometry appears comparatively weak, thereby allowing the development of laterally extensive subhorizontal passages. This configuration is consistent with dissolution focused along relatively stable redox interfaces, where ascending H₂S-rich fluids encounter oxidising conditions, promoting lateral corrosion and the formation of low-gradient conduits. Most dissolution occurred near the water-air interface and in the aerated part of the cave, driven by condensation-corrosion. Within this interpretative framework, the present cave level likely records a relatively long-lived phase of base-level stability, during which the local paleo-base level and the cave system were broadly coincident in elevation. In addition, the spatial distribution and functional association of the observed cave rocky relief features point to vertically organised fluid circulation, including buoyancy-driven convective components. This hydrodynamic regime implies very low-energy flow conditions and is notably devoid of indicators of turbulent movement (e.g., scallops). Rising pathways appear to originate along fractures and steeply inclined bedding planes that act as inlet zones, progress upward through transitional morphologies preserved on cave walls and ceilings and culminate in outlet structures such as cupolas and chimneys (Fig. 3B-G). The occurrence of solution pseudo-notches indicates the past presence of vadose standing-water pools in an air-filled subterranean environment, features known to develop relatively rapidly in thermal sulfuric acid cave systems (De Waele & Gutierrez, 2022). Winding ceiling channels, while potentially polygenetic in origin, may locally reflect a condensation-corrosion mechanism driven by the circulation of warm, moisture-saturated rising air, further contributing to ceiling dissolution and morphological complexity. Collectively, this suite of morphologies, together with the absence of indicators of turbulent flow, provides strong diagnostic evidence of hypogenic speleogenesis for the Lapa das Almoinhas (Klimchouk, 2007; De Waele & Gutierrez, 2022; and references therein).

Regional geological and hydrogeological data indicate an active, structurally controlled fluid system associated with the Leiria-Parceiros diapir. A highly mineralised fluid enriched in Na, SO₄, and Cl occurs nearby, according to geochemical maps produced by Eggenkamp et al. (2015). Ca-SO₄ spring waters have been documented in Plio-Pleistocene sandstones overlaying the Monte Real diapir (~15 km north) (Fig. 1A) (Rebelo et al., 2015). Further southwest, Ca-SO₄ / Na-Cl thermal mineralised spring waters near Nazaré (~20 km) are linked to deep circulation along the Nazaré Fault system, which is structurally connected to the Caldas da Rainha diapir (Fig. 1A), at a depth of about 1-2 km (Rebelo et al., 2015; Marques et al., 2017). Importantly, hydrocarbon evidence further strengthens the interpretation of deep-seated reducing-fluid migration. In São Pedro de Moel (~20 km west), an oil seep associated with a biodegraded petroleum accumulation has been reported at the northern termination of the local diapiric structure. This occurrence indicates active or recently active hydrocarbon migration along diapir-carbonate contacts, with likely source rocks including Sinemurian-Pliensbachian organic-rich shales and possibly Triassic-Hettangian evaporitic sequences (Davison & Barreto, 2020). The coexistence of hydrocarbons and reduced sulphur species indicates a

common deep-seated origin and shared migration pathways, through which hydrocarbons may promote strongly reducing conditions and potentially drive the generation of H_2S and CO_2 via thermochemical sulphate reduction (TSR) at depth (Kharaka & Hanor, 2003).

Taken together, these occurrences delineate a regional-scale, vertically integrated fluid-flow system, structurally focused on deep-rooted discontinuities, capable of transporting reduced chemical species—including H_2S , CO_2 , and hydrocarbons—into shallow carbonate units. By analogy, similar processes are likely to have operated in the geological past. Within this framework, cave initiation and enlargement are more consistently explained by the SAS model driven by the oxidation of ascending H_2S -bearing fluids (e.g., Palmer, 2007, 2013). The documented presence of SO_4 -rich waters in nearby diapiric systems confirms the regional availability of reduced sulphur species, likely mobilised along structurally controlled pathways. As these fluids ascend and encounter oxidising conditions—either through mixing with meteoric waters or within the vadose zone— H_2S oxidation produces sulphuric acid (H_2SO_4) in situ, leading to aggressive dissolution of carbonate host rocks even at relatively low temperatures. While TSR may have occurred at considerable depth (~120-140 °C), particularly in hydrocarbon-bearing settings that enhance reducing conditions and the production of H_2S and CO_2 , the hydrogeological and geochemical evidence more strongly supports a model in which shallow-level oxidation processes dominate speleogenesis. In this context, diapiric structures serve as both sources of reduced fluids (sulphur- and hydrocarbon-bearing) and preferential conduits for their upward migration. By contrast, dissolution is concentrated at redox interfaces where oxidation is most effective. Progressive uplift, erosion, and/or base-level lowering likely established connectivity with the surface, allowing meteoric waters to infiltrate the system and partially overprint the earlier morphology through a few secondary carbonate deposition events.

5. FINAL REMARKS

The Lapa das Almoinhas constitutes a robust case study of karstic cave development within a structurally complex, diapir-influenced sector of the Leiria region (central Portugal). Its evolution reflects the interplay between halokinetic deformation associated with the Leiria–Parceiros diapir and structurally controlled permeability, particularly along a segment of the Nazaré Fault system. These structural controls promoted focused subsurface fluid circulation, enhancing vertical connectivity and facilitating the ascent of thermal and highly mineralised fluids. The cave's internal morphologies preserve clear evidence of an early hypogenic speleogenetic phase consistent with SAS, driven by deep-seated fluid flow, structurally guided by diapiric uplift and associated fissure networks. Subsequent epigenic overprinting has partially modified and obscured these initial features, underscoring the limitations of single-process interpretations in complex karst systems. In this context, Lapa das Almoinhas highlights the need for a polygenetic framework in karst research, in which speleogenesis is understood as the cumulative outcome of temporally distinct but dynamically linked processes. Although this case study alone is insufficient to establish a comprehensive regional model of hypogenic karstification, it reinforces the critical role of structural inheritance and hydrogeological organisation in the development of deep karst systems in diapiric settings. Future research should prioritise high-resolution geomorphological and structural cave mapping, including detailed morpho-sequence analysis, mineral characterisation, and absolute speleothem dating, integrated with hydrogeological and geochemical datasets. This combined approach is essential to constrain the timing, processes, and feedback governing the interaction between hypogenic and epigenic speleogenetic phases. Ultimately, such an integrated framework will be key to refining speleogenetic models in Portugal and in analogous tectono-sedimentary and diapiric contexts.

Acknowledgements

This research was supported by the Centre of Studies in Geography and Spatial Planning (CEGOT), which is funded by the Foundation for Science and Technology (FCT) under reference UIDB/04084/2025. We also acknowledge the Núcleo de Espeleologia de Leiria (NEL) for their ongoing speleological and topographic support throughout this work, and extend special thanks to Pedro Galvão, João Ferreira, Flávio Lucas, Vitantonio Venezia and Maria de Brito.

References

- Amaral, D., Dimuccio, L. A., Callapez, P. M., & Cunha, L. (2024). Alexander Klimchouk (1956-2023) e a espeleogénese hipogénica: possibilidades de investigação em Portugal. Em A. P. de Geomorfólogos (Ed.), *Atas do 10º Congresso Nacional de Geomorfologia: Dinâmicas geomorfológicas no espaço e no tempo* (pp. 181–186, Vol. 12). Publicações da Associação Portuguesa de Geomorfólogos.
- Cigna, A. (1978). A Classification of Karstic Phenomena. *International Journal of Speleology*, 10: 3–9.
- Davison, I. & Barreto, P. (2020). Deformation and sedimentation processes, and hydrocarbon accumulation on upturned salt diapir flanks in the Lusitanian Basin, Portugal. *Petroleum Geoscience* 27, 2019–2138.
- De Waele, J., & Gutiérrez, F. (2022). *Karst Hydrogeology, Geomorphology and Caves*. Wiley Blackwell.
- Eggenkamp, H. G. M., Marques, J. M., & Neves, O. (2015). *A Geochemical Atlas of the Portuguese Mineral Waters*. Centro de Recursos Naturais e Ambiente (CERENA), Instituto Superior Técnico.
- Ford, D., & Williams, P. (2007). *Karst Geomorphology and Hydrology*. Chapman & Hall, London.
- Kharaka, Y.K., Hanor, J.S., (2003). Deep fluids in the continents: I. Sedimentary Basins. *Treatise on Geochemistry*, V. 5, 1–48.
- Klimchouk A. (2007). Hypogean speleogenesis: hydrogeological and morphometric perspective. Special Paper 1, National Cave and Karst Research Institute, Carlsbad, NM: 106 p.
- Klimchouk A. (2017). Types and Settings of Hypogene Karst. In A.B. Klimchouk, A.N. Palmer, J. De Waele, A.S. Auler, & P. Audra (Eds.), *Hypogene Karst Regions and Caves of the World*, 1–39. Springer.
- Kullberg, J.C., Rocha, R.B., Soares, A.F., Rey, J., Terrinha, P., Azerêdo, A.C., Callapez, P., Duarte, L.V., Kullberg, M.C., Martins, L., Miranda, J.R., Alves, C., Mata, J., Madeira, J., Mateus, O., Moreira, M., (2013). A Bacia Lusitaniana: Estratigrafia, Paleogeografia e Tectónica. In: R. Dias, A. Araújo, P. Terrinha, J.C. Kullberg, (Eds). *Geologia de Portugal. Vol. II – Geologia Meso-cenozóica de Portugal*. Livraria Escolar Editora, 317–368.
- Marques, J. M., Matos, C., Carreira, P. M., & Neves, M. O. (2017). Isotopes and geochemistry to assess shallow/thermal groundwater interaction in a karst/fissured-porous environment (Portugal): a review and reinterpretation. *Sustainable Water Resources Management*.
- Palmer, A. N. (2007). *Cave Geology*. Allen Press.
- Palmer, A. N. (2013). Sulfuric acid caves: morphology and evolution. In: SCHRODER, J., FRUMKIN, A., *Treatise on Geomorphology*. Academic Press, *Karst Geomorphology* 6, 241–257.
- Polyak, V.J. & Provencio, P. (2001). By-product materials related to H₂S-H₂SO₄ influenced speleogenesis of Carlsbad, Lechuguilla, and other caves of the Guadalupe Mountains, New Mexico. *Journal of Cave and Karst Studies* 63(1), 23–32.
- Rebelo, M., Silva, E. F., & Rocha, F. (2015). Characterization of Portuguese thermo-mineral waters to be applied in peloids maturation. *Environmental Earth Sciences*, 73, pp. 2843–2862.
- Slabe, T., 1995: Cave Rocky Relief and its Speleogenetical Significance, ZRC 10, Ljubljana, p. 128.
- Teixeira, C., Zbyszewski, G., Torre de Assunção, C., & Manupella, G. (1968). Notícia explicativa da folha 23C (Leiria), LNEG.

Los bufones de Pría: morfología, tipología e implicaciones geopatrimoniales en la costa oriental asturiana

The blowholes of Pría: morphology, typology and geoheritage implications on the eastern Asturian coast

L. Núñez de Con¹*, J. Ruiz-Fernández¹

¹ Departamento de Geografía, Univ. de Oviedo, C/ Amparo Pedregal s/n, 33011, Oviedo, España.

* uo294767@uniovi.es

RESUMEN

Se analiza la diversidad tipológica de los bufones que integran el campo de Pría (Llanes, Asturias), donde el predominio de formas activas con función de surtidor, su elevada concentración y sus características morfológicas singulares le confieren un alto interés geopatrimonial. En concreto, se han estudiado 28 bufones cuyo desarrollo está controlado por la estratificación y/o la fracturación del macizo calcáreo. Sus dimensiones varían entre 0,30 y 10,80 m de largo y entre 0,27 y 9,20 m de ancho, con superficies de 0,10 a 62,56 m² (media de 11 m²). Predomina la morfología elíptica (54 %). Del total, 23 son activos y 21 funcionan como surtidores. Se documentan orlas sedimentarias en los bordes de 9 bufones y marcas de abrasión en otros 9.

Palabras clave: *bufones, karst litoral, patrimonio geomorfológico, Asturias.*

Keywords: *blowholes, coastal karst, geomorphological heritage, Asturias.*

1. INTRODUCCIÓN

Los bufones son geoformas de génesis kárstico-marino que emiten chorros de aire y/o agua a presión debido a la apertura de conductos en las proximidades de los bordes de los acantilados calcáreos. Se forman por la confluencia de un conducto kárstico, generado por la disolución de las calizas que integran la parte culminante de un acantilado, a favor de planos de estratificación o de líneas de fracturación del roquedo, con otro abierto en la base por el oleaje (Romero-López, 1984; Flor y Flor-Blanco, 2013). Pese a sus reducidas dimensiones, su peculiar funcionamiento y su rareza a escala global las convierten en formas de gran interés desde el punto de vista del geopatrimonio. En este sentido, a nivel mundial estas morfologías son escasas, pues dependen de condiciones litológicas, estructurales y marinas muy específicas. Existen ejemplos en Punakaiki (Nueva Zelanda), Kiama (Australia), las islas Shetland (Reino Unido), la cadena de Alofaaga (Samoa) y la planicie de Nullarbor (Australia; Doerr et al., 2011). A escala nacional cabe citar los campos de bufones del litoral calcáreo del oriente asturiano. Destacan especialmente los campos de bufones de Pría y de Arenillas, que, según Flor-Blanco et al. (2023), constituirían la mayor concentración de estas geoformas en Europa y, posiblemente, una de las mayores del mundo. Este trabajo se centra en el campo de bufones de Pría y tiene como objetivo identificar, caracterizar y clasificar los tipos de bufones presentes en dicho sector.

2. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio corresponde al campo de bufones de Pría (Llanes, Asturias), cuyos límites se definen al oeste por la desembocadura del río Guadamía, al norte por el mar Cantábrico, al sur por la localidad de Llanes de Pría y al este por el sendero que conecta este núcleo de población con el área de los

bufones (Figura 1). Se encuadra en la rasa calcárea, que constituye el escalón inferior de la marina oriental asturiana, con altitudes entre 10 y 65 m s.n.m. y una topografía predominantemente llana, aunque rugosa en detalle debido a la intensa karstificación. Esta franja costera posee una anchura de 3 a 5 km (Muñoz-Jiménez, 1982) y sobre ella se elevan las sierras planas cuarcíticas, antiguos niveles de abrasión marina del Mioceno (~260 m) y del Plioceno (~155 m; Mary, 1983). Geológicamente, el sustrato está formado por calizas de la Formación Valdeteja (Carbonífero superior), pertenecientes a la Región de Mantos de la Zona Cantábrica (Julivert, 1983). Estas calizas se encuentran truncadas principalmente por fallas de rumbo NNO-SSE. La naturaleza calcárea y la disposición estructural controlan la organización geomorfológica, favoreciendo el desarrollo de un profuso relieve kárstico integrado por bufones, dolinas y lapiaces de diversas tipologías.

3. METODOLOGÍA

Este trabajo se basa en un recorrido sistemático del área de estudio para reconocer y cartografiar las formas del relieve existentes, con especial atención a la localización y la descripción de los bufones. Esto permitió elaborar un mapa geomorfológico en QGIS 3.40, utilizando las ortofotografías de Máxima Actualidad del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) y el Modelo Digital del Terreno del PNOA. La salida gráfica se realizó con Adobe Illustrator 2026 (v30.0), aplicando el método cartográfico RCP 77 del CNRS francés (Joly, 1997; Figura 1). Por otro lado, para estudiar en detalle cada bufón (n=28), se confeccionó un modelo de ficha con la siguiente información: emplazamiento (coordenadas), altitud (m s.n.m.), dimensiones (largo x ancho, en m), superficie (m²), dirección, litología, morfología en planta, establecida a partir de la relación entre la longitud y la anchura – circular (1:1), elíptica (1:2), lineal (1:3) o irregular (sin morfología definida) –, tipología (morfología en planta y alzado, presencia o ausencia de sedimentos asociados), grado de actividad (activo/inactivo), función de surtidor (sí/no) y un apartado de descripción en el que se incluyen las observaciones de campo (existencia o no de orla sedimentaria, de huellas abrasión, etc.). No se han tenido en consideración las formas incipientes menores de un metro de diámetro, salvo en los casos en los que su impronta sea significativa, como ocurre con las catalogadas como bocas bufadoras (bufones de limitadas dimensiones, pero muy activos, que funcionan emitiendo potentes corrientes de aire e incluso chorros de agua).

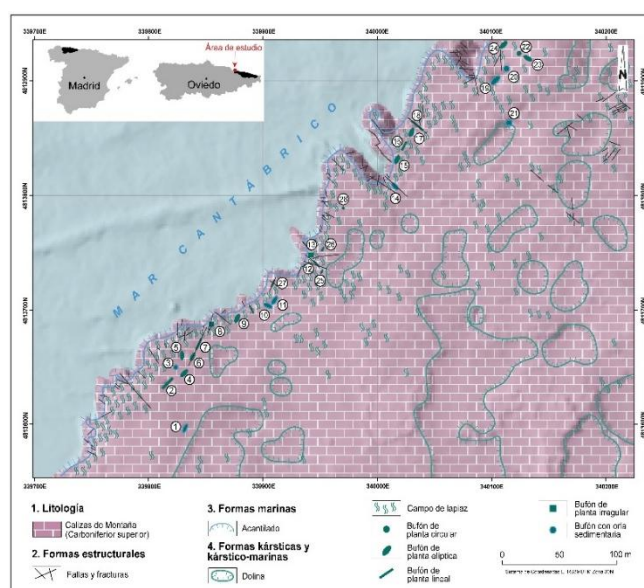


Figura 1. Localización del área de estudio y mapa geomorfológico, con la numeración de los bufones estudiados.

4. RESULTADOS

Los bufones constituyen geoformas cuyo desarrollo y morfología presentan un alto grado de control estructural. Así, de los 28 catalogados en Pría, 11 están directamente relacionados con la estratificación y 8 están controlados por fracturas. A su vez, de estos últimos, cinco casos presentan calizas brechoides en sus paredes o en el roquedo circundante, que guardan una relación inequívoca con la presencia de discontinuidades de origen tectónico. En el resto de los casos, no se ha podido determinar ese control debido a su recubrimiento por sedimentos. Los bufones identificados varían entre 0,30 m de longitud (L) mínima (boca bufadora nº 26) y 10,80 m de longitud máxima (bufón de la Bramadoria nº 18). Por su parte, las anchuras (A) oscilan entre 0,27 m (boca bufadora n.º 27) y 9,20 m (bufón n.º 21). Sin embargo, la mayoría presenta dimensiones reducidas, por lo que más de la mitad tiene una L inferior a 4 m y una A inferior a 3 m. En relación con ello, las superficies en planta abarcan desde 0,10 m² en el de menor tamaño (boca bufadora nº 26) hasta 62,56 m² en el de mayores dimensiones, situado en el sector NE (bufón nº 21; Figuras 1 y 2B). En suma, los bufones de menor tamaño (<1 m²) corresponden, en todos los casos, a las denominadas bocas bufadoras (n.º 25 a 28; Figura 2A), mientras que los de mayor superficie (>30 m²) son los n.º 8, 19 y 21. La superficie media es de 11,0 m². Las altitudes en las que se desarrollan las bocas de los bufones sobre la rasa calcárea fluctúan entre 16 y 38 m s.n.m. El valor más frecuente es 17 m (36 % del total), seguido de 16 y 18 m, con tres bufones en cada caso. A 33 m se encuentran cuatro geoformas, mientras que el resto de las altitudes se distribuye de forma aislada en la horquilla de 21 a 38 m. En resumen, dos tercios de los bufones se localizan por debajo de 20 m s.n.m.

En cuanto a la morfología en planta, se distinguen cuatro tipos: elíptica (54 %; Figura 2D), lineal (21 %; Figura 2C), circular (4, 14 %) e irregular (3, 11 %; Figura 2B). Por su parte, la tipología de los bufones, que combina su forma en planta con la presencia o ausencia de orla sedimentaria asociada y con el perfil, suma 13 categorías distintas. Las más repetidas son: elíptica con perfil vertical (7 casos), lineal con perfil vertical (4 casos), elíptica con orla sedimentaria y perfil en embudo (2 casos), elíptica con orla sedimentaria parcial y perfil en embudo (2 casos) y circular con orla sedimentaria parcial y perfil en embudo (2 casos). El resto de las tipologías aparece una sola vez en cada caso. Cabe citar la tipología denominada boca bufadora (Figura 2A), integrada por conductos muy estrechos que emiten chorros sonoros de aire (y, en dos casos, de agua). De los cuatro ejemplos existentes, tres han sido definidos como tales y el cuarto es una boca bufadora con orla sedimentaria asociada.

Por lo que respecta al grado de actividad, 23 bufones son activos (82 %) y 5 son inactivos (18 %). Se trata de los bufones 3, 8, 9, 13 y 24. En su mayor parte, la inactividad se debe a que sus conductos quedan desconectados de la base del acantilado por el retroceso del perfil costero y, por tanto, quedan completamente aislados de la acción del oleaje. Es decir, son formas relictas. Sin embargo, en otros casos, el conducto está obstruido por sedimentos. En este sentido, consideramos que el bufón n.º 3, con la boca totalmente ocluida por sedimentos finos y cantos calcáreos, es inactivo momentáneamente, ya que se encuentra separado únicamente por un estrecho tabique de caliza del bufón n.º 4, que es plenamente activo y funciona incluso como surtidor. Por ello, no sería descartable que el anterior volviera a funcionar como tal. De los 23 activos, 21 funcionan como surtidores y emiten chorros de agua en los momentos de máxima actividad. Los dos restantes, coincidentes con las bocas bufadoras nº 25 y 26, solo generan corrientes de aire. En relación con su función como surtidores, cabe mencionar que nueve bufones conservan marcas de pulido o abrasión producidas por los chorros de agua que emiten, cargados de arena marina (son los bufones 1, 5, 6, 16, 17, 18, 19, 21 y 23). Las arenas emitidas por estas geoformas se acumulan en los bordes de algunas de ellas, generando orlas sedimentarias, presentes igualmente en nueve bufones. Cuatro de estas orlas son totales (bufones n.º

1, 10, 11 y 28) y cinco son parciales (n.º 3, 14, 19, 20 y 21). Finalmente, cabe señalar que los afloramientos calizos que conforman la boca de los bufones, así como sus inmediaciones, están profusamente karstificados. Entre los lapiaces identificados en sus contornos, la tipología en alveolos es la más frecuente, junto a los oquerosos (*hohlkarren*), los *rundkarren* y los lapiaces en torrecillas, que quedan entre medias de los anteriores. También se identificaron ejemplos de *rillenkarren*, *rinnenkarren* y *splitkarren*.

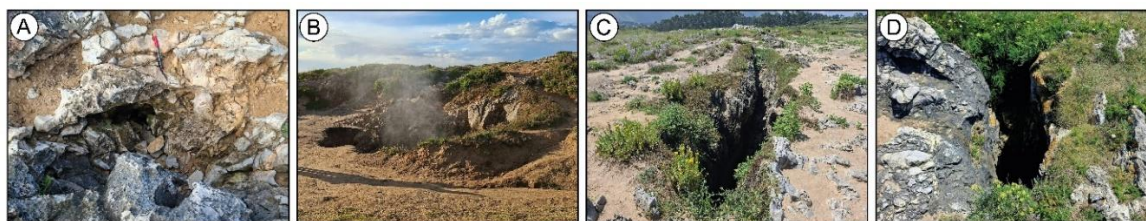


Figura 2. Ejemplos de tipologías de bufones: (A) boca bufadora (nº 25); (B) de planta irregular con orla sedimentaria parcial y perfil en embudo (nº 21); (C) de planta lineal con perfil vertical (nº 2); y (D) de planta elíptica con perfil vertical (nº 23).

5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Las características de los bufones existentes en el campo de Pría, su diversidad tipológica, su alta concentración con 28 ejemplos en un área reducida (no obstante, existen más en las proximidades, tanto hacia el este, como en la margen occidental de la desembocadura del río Guadamía), el predominio de formas activas, así como su función como surtidores, confieren a este conjunto una rareza y singularidad que lo sitúan entre los más relevantes a escala global. Esta excepcionalidad respalda su consideración como patrimonio geomorfológico de interés internacional, tal y como han resaltado previamente otros estudios (Flor-Blanco et al., 2023). Sin embargo, su fragilidad ante la presión antrópica exige integrar criterios de conservación en las futuras estrategias de gestión, que permitan el aprovechamiento sostenible de sus valores científicos, educativos y turísticos.

Agradecimientos

Este trabajo aborda parte de los temas de investigación del proyecto PID2020-115269GB-I00 (MICINN, Gobierno de España) y se enmarca en el Grupo de Inv. GEA Frost (UNIOVI, referencia GR-2024-0012).

Referencias

- Doerr, S. H., Davies, R. R., Lewis, A., Pilkington, G., Webb, J. A., Ackroyd, P. J., & Bodger, O. (2012). Origin and karst geomorphological significance of the enigmatic Australian Nullarbor Plain blowholes. *Earth Surface Processes and Landforms*, 37(3), 253–261.
- Flor, G., & Flor-Blanco, G. (2013). Geomorfología del litoral oriental de Asturias. En: Flor, G. y Flor-Blanco, G. (eds.), VII Jornadas de Geomorfología Litoral, Universidad de Oviedo, Oviedo, pp. 2–27.
- Flor-Blanco, G., Adrados, L., Llana Fúnez, S., & Bruschi, V.M. (2023). Los campos de bufones de Pría y Arenillas (Asturias). ¿Patrimonio geológico mundial? *Geogaceta*, 74, 91–94.
- Joly, F. (1997). *Glossaire de géomorphologie. Base de données sémiologiques pour la cartographie*. Armand Colin.
- Julivert, M. (1983). La estructura de la Zona Cantábrica. En: Libro jubilar a J.M. Ríos. *Geología de España* (pp. 339–381). Instituto Geológico y Minero de España.
- Mary, G. (1983). Evolución del margen costero de la Cordillera Cantábrica en Asturias desde el Mioceno. *Trabajos de Geología*, 13, 3–35.
- Muñoz-Jiménez, J. (1982). Geografía física. El relieve, el clima y las aguas. En F. Quirós Linares (dir.), *Geografía de Asturias* (pp. 271), Ayalga Ediciones.
- Romero-López, D. (1984). Tipología de formas kársticas y relaciones morfoestructurales en la marina oriental asturiana. *Ería*, 7, 119-134.

Capítulo II - Geomorfologia litoral

Modelagem do nível do mar como subsídio ao ordenamento territorial de Galinhos – Rio Grande do Norte, Brasil 2024 e 2100

Sea-level modelling to support spatial planning in Galinhos – Rio Grande do Norte, Brazil: 2024 and 2100

J. Silva¹*, M. Diniz², J. Santos³, T. Silva⁴, R. Silva⁵

¹ Universidade Federal da Paraíba, Programa de Pós-Graduação em Geografia, João Pessoa, PB, Brasil

^{2 e 3} Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Departamento de Geografia, Centro de Ensino Superior do Seridó, Caicó, RN, Brasil

⁴ Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Departamento de Geografia, Centro de Ciências Humanas Letras e Artes, Natal, Brasil

⁵ Universidade Federal da Paraíba, Departamento de Geociências, João Pessoa, PB, Brasil

* jucyelho@hotmail.com

RESUMO

Diante da importância de estudos de modelagens preditivas do aumento do nível do mar para o ordenamento territorial, esta pesquisa tem como objetivo subsidiar o ordenamento territorial do município de Galinhos por meio de modelagem preditiva da elevação do nível do mar e análises geoespaciais. Para isto é aplicada a metodologia de modelagem em SIG, pela qual foi possível especializar e quantificar que o município de Galinhos apresenta entre 50,2% a 80,9% da sua zona urbana suscetível a inundações decorrentes da elevação do nível do mar até o ano de 2100.

Palavras-chave: Modelagem, SIG, Modelo de Inundação Passiva, Costa Branca, Cenários, IPCC.

Keywords: Modeling, GIS, Bathtub Model, White Coast, Scenarios, IPCC.

1. INTRODUÇÃO

A elevação do nível do mar vem se tornando tema prioritário no planejamento de regiões costeiras devido principalmente ao aumento da frequência de inundações e de erosão. Esses processos geram impactos críticos, afetando desde a infraestrutura urbana e a economia local até a preservação de ecossistemas costeiros, exigindo estratégias de mitigação e adaptação mais robustas (Mishra et al., 2026). Diante destas preocupações esta pesquisa tem como objetivo subsidiar o ordenamento territorial do município de Galinhos por meio de modelagem preditiva da elevação do nível do mar e análises geoespaciais.

2. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo desta análise é o recorte urbano do município de Galinhos pertencente ao estado do Rio Grande do Norte na região Nordeste do Brasil, conforme a Figura 1.



Figura 1. Mapa de localização da zona urbana de Galinhos – Rio Grande do Norte, Brasil 2016.

A escolha desta área se justifica por apresentar elevada susceptibilidade a inundações, como analisado por Silva, Azevedo e Diniz (2016) no município ao lado com as mesmas características geomorfológicas, e esta área estar assente sobre planícies com presença de campos de dunas e depressões, se opondo a localização da maioria dos demais municípios da região nordeste do Brasil que tem seus núcleos urbanos predominantemente sobre areias de restingas (Diniz, et al., 2020).

3. METODOLOGIA

O procedimento metodológico para esta pesquisa consistiu em três grandes grupos, de um lado a metodologia para obtenção da topografia, do outro o levantamento dos dados oceanográficos para a obtenção da cota de inundação e como terceiro a modelagem em SIG para projetar, quantificar e analisar os possíveis impactos da elevação do nível do mar.

Na aquisição dos dados topográficos foi feito um levantamento aéreo utilizando um Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) da marca DJI modelo Mavic Air 2S e coletados pontos de controle e checagem com receptores do Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS) da marca CHCNAV modelo I90.

O levantamento aéreo foi planejado e executado utilizando o website e aplicativo da Drone Harmon, e os pontos de controle e checagem foram coletados respeitando a proporção de dois terços (2/3) para pontos de controle e um terço (1/3) para pontos de checagem (validação da acurácia). O levantamento foi processado no *software* de estereoscopia digital Agisoft Metashape o qual permitiu a obtenção da topografia (MDT – Modelo Digital do Terreno).

Quando ao grupo da obtenção dos dados oceanográficos, foram obtidos como dados de entrada quatro variáveis: 1 – maré astronômica, 2 - dados de espraio das ondas (wave run-up), 3 - marés meteorológicas, 4 - elevação do nível do mar. Duas destas variáveis (dados de espraio das ondas e marés meteorológicas) foram obtidas do Sistema de Modelagem Costeira do Brasil (SMC Brasil); enquanto que a maré astronômica foi obtida da tábua de maré disponibilizado pelo Centro de Hidrografia da Marinha e Banco Nacional de Dados Oceanográficos (CHM-BNDO); e para obtenção da última variável (elevação do nível do mar) esta foi tirada do AR6 do IPCC considerando as máximas previstas em cada cenário SSP.

Com estes dados foi possível executar a modelagem em SIG a qual conta com 5 dados de entrada: 4 variáveis oceanográficas e 1 derivado do processamento fotogramétrico (Erro Residual na cota Z (m) do MDT) como aplicado por Araújo et al., 2021 e esquematizado conforme a Figura 2.

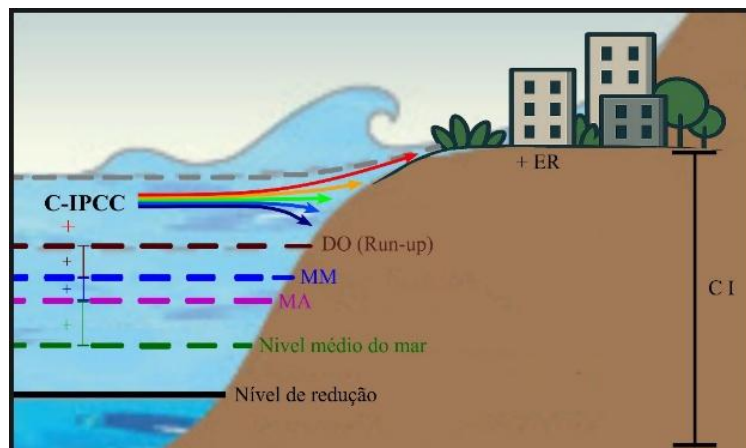


Figura 2. Representação da modelagem e projeção do nível do mar em SIG.

Esta modelagem em SIG também conhecida como modelagem do tipo inundação passiva (ou "bathtub") vem ganhando destaque por ser de fácil aplicação e sendo amplamente utilizada (e.g., Williams e Lück-Vogel, 2020; Rahman et al., 2026). Ela consiste no somatório das variáveis consideradas, dada pela equação [01]:

$$CI = MA + DO + MM + C-IPCC + ER \quad [1]$$

Onde,

CI é a cota de inundação; MA a maré astronômica máxima (máxima das marés de sizígia); DO a dados de ondas (média das máximas de espraio); MM a média das marés meteorológicas máximas; C-IPCC as máximas dos Cenários do IPCC; ER o erro residual na cota Z do modelo topográfico.

4. RESULTADOS

Com a aplicação desta metodologia na área de estudo foi possível obter as manchas das possíveis inundações (áreas susceptíveis a elevação do nível do mar) de acordo com vários cenários (Figura 3).

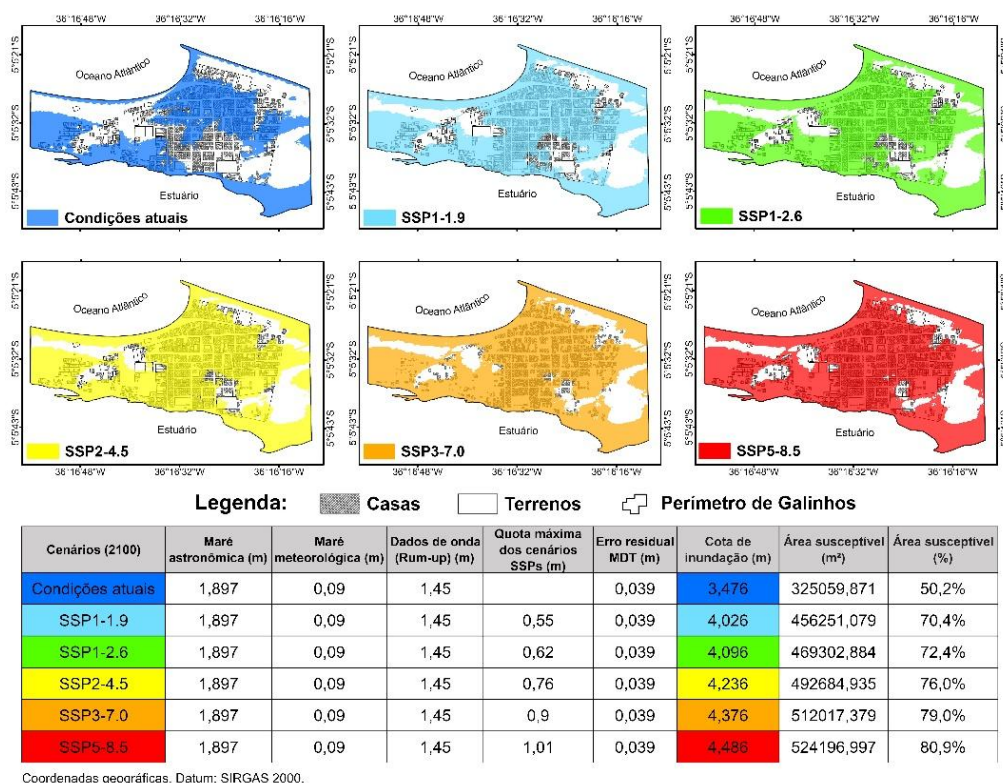


Figura 3. Mapa de suscetibilidade a inundações pela elevação do nível do mar em Galinhos – Rio Grande do Norte, Brasil, 2024 e 2100.

De acordo com os resultados obtidos, no ano de 2024 em que foram obtidos estes dados, o município em suas condições atuais (cor azul escuro) sem considerar o aumento do nível do mar previsto pelo IPCC, apenas considerando a possibilidade de coincidir as máximas previstas nas demais variáveis, observa-se que o nível do mar poderá atingir a cota altimétrica de 3,476 m de altura com isto tornado 50,2% do território susceptíveis inundações atuais. Quando considerado o aumento previsto pelo IPCC (2023) para o ano de 2100 estas áreas susceptíveis aumentam para 70,4% no cenário SSP1-1.9, 72,4% no cenário SSP1-2.6, 76% no cenário SSP2-4.5, 79% no cenário SSP3-7.0 e 80,9% no cenário SSP5-8.5.

5. DISCUSSÃO E CONCLUSÃO

Os dados apresentados para a área corroboram os resultados obtidos anteriormente por Silva, Azevedo e Diniz (2016) e Diniz et al. (2020), confirmando que entre 50% e 80% do território mapeado ficará suscetível a inundações decorrentes da elevação do nível do mar até 2100.

Com isto é possível concluir que o objetivo da pesquisa foi alcançado com êxito, pois permitiu a espacialização das manchas de suscetibilidade a inundações decorrentes da elevação do nível do mar por meio da metodologia proposta (modelagem em SIG), fornecendo-se assim análises e peças técnicas úteis ao ordenamento territorial costeiro local e validação metodológica que servirão para aplicabilidades em outras regiões costeiras do mundo.

Agradecimentos

Os autores agradecem: A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES pela bolsa de Doutorado do primeiro autor, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq pela bolsa de produtividade dos pesquisadores 2 e 5 e pelo financiamento da pesquisa através da chamada CNPQ/MCTI/FNDCT N°59/2022.

Referências

- Araújo, V. N., Amaro, V. E., Aguiar, L. S., Lima, C. C., & Lopes, A. B. (2021). Tidal flood area mapping in the face of climate change scenarios: Case study in a tropical estuary in the Brazilian semi-arid region. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 21, 3353–3366. <https://doi.org/10.5194/nhess-21-3353-2021>
- Diniz, M. T. M., Silva, S. D. R. da, Silva, J. P. da, & Costa, D. F. da S. (2020). Unidades de paisagem da Costa Branca, nordeste do Brasil. *Revista do Departamento de Geografia*, 39, 169–183. <https://doi.org/10.11606/rdg.v39i0.159807>
- Mishra, M., Zerouali, B., Paul, S., Bhattacharyya, D., Guria, R., Suna, M., Silva, R. M., Ranagalage, M., & Santos, C. A. G. (2026). Coastal futures at risk: Adaptive coastal management and policy insights from sea level rise and shoreline change in West Bengal, India. *Science of The Total Environment*, 1011, 652. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.181238>
- Rahman, M., Benaafi, M., Rahman, S. M., Rahman, M., Patwary, A. I., & Aljundi, I. H. (2026). Scenario-driven data fusion for compound coastal flood risk and exposure assessment using night-time lights in Jeddah. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 17(1), 2617002. <https://doi.org/10.1080/19475705.2026.2617002>
- Silva, J. P. da, Azevedo, J. M., & Diniz, M. T. M. (2016). Estimativas de impactos da elevação do nível do mar em 2100 na zona urbana de Caiçara do Norte/RN. *Revista de Geociências do Nordeste*, 2, 1368–1377.
- Williams, L. L., & Lück-Vogel, M. (2020). Comparative assessment of the GIS-based bathtub model and an enhanced bathtub model for coastal inundation. *Journal of Coastal Conservation*, 24(2), 23. <https://doi.org/10.1007/s11852-020-00735-x>

Evolução preliminar da Linha de Costa entre o Cabo Mondego e a Costa de Lavos: o impacte da forte agitação e tempestades marítimas

Preliminary assessment of Shoreline Evolution between Cabo Mondego and Costa de Lavos (Western Portugal): response to high-energy wave forcing and extreme storm events

M. P. Gouveia^{1,2*}, A. P. Fernandes¹, J. L. Rocha¹, J. A. Marques-Silva¹

¹ Município da Figueira da Foz, CI. CMAC, Figueira da Foz

² MARE - Centro de Ciências do Mar e do Ambiente

* maria.gouveia@CM-FigFoz.pt

ABSTRACT

This study focuses on assessing the evolution of the coastline along the stretch between Buarcos and Costa de Lavos beaches, and its variation to the north and south of the port of Figueira da Foz for the period between 2010 and 2025. The study assessed the changes in the coastal sector of the beaches south of the Port of Figueira da Foz, specifically Cabedelo and Cova Gala beaches, between breakwaters 3 and 4 since 2018. It also examines the artificial beach nourishment carried out between June and September 2025, as well as the impact of winter storms. Preliminary analysis indicates spatial variation in beach evolution over the last decade. Claridade and Cabedelo beaches show relatively stable behaviour, while Cova Gala beach exhibits significant erosion between the 4th and 5th groynes, consequently highlighting the combined influence of wave action and human activities on sediment dynamics.

Keywords: *Figueira da Foz; coastline; erosion; accretion; monitoring.*

Palavras-chave: *Figueira da Foz; linha de costa; erosão; acreção; monitorização.*

1. INTRODUÇÃO

A linha de costa atlântica em Portugal continental é controlada por um sistema morfodinâmico complexo, sujeito a um regime de agitação marítima dominante de NW, deriva litoral para S e pela disponibilidade sedimentar muito condicionada pelas intervenções antrópicas. Na área envolvente da Figueira da Foz observam-se sectores em acreção relacionados com retenção de sedimentos junto às estruturas portuárias e sectores com erosão costeira acentuada relacionados com défices sedimentares. Esta tendência manifesta-se de forma particularmente expressiva ao longo do sector costeiro entre Cova-Gala e Costa de Lavos onde o recuo da linha de costa, contribui para uma vulnerabilidade crescente a eventos extremos.

A morfologia e a dinâmica litoral têm sido amplamente estudadas ao longo do tempo (e.g. Abecasis et al., 1962; André, 1996; Cunha & Dinis, 1998; Laranjeiro et al., 2003; Silva et al., 2015; Oliveira et al., 2016). A costa oeste de Portugal continental apresenta um regime mesomareal semidiurno e ondulação dominante NW–WNW (direção média), gerada pelos sistemas depressionários no Atlântico Norte e controlada pela circulação atmosférica dominante (Anticiclone dos Açores). Esta ondulação

propaga-se até à costa onde incide obliquamente, condicionando o transporte sedimentar longitudinal, tendencialmente dirigido para sul (Cunha et al., 2006). Contudo, verifica-se também a ocorrência de ondulações de W e SW, particularmente durante o inverno, podendo induzir o transporte sedimentar para norte e para sul (Vicente, 1990). A amplitude de maré apresenta valores máximos entre os 3,0 – 3,3 m podendo o nível médio do mar atingir valores superiores a 4 m devido à sobre-elevação meteorológica em situações de eventos extremos.

No âmbito de interesse municipal este estudo visa caracterizar a evolução da linha de costa no troço costeiro compreendido entre a praia de Buarcos e a praia da Costa de Lavos, bem como analisar os perfis transversais na praia do Cabedelo e na Cova Gala. A área em estudo tem uma extensão de ca. 12 km até à Costa de Lavos e uma orientação da linha de costa N/S a norte da embocadura do rio, até ao Cabo Mondego, rodando progressivamente para NNE/SSW a sul. O sector costeiro entre o Cabo Mondego e a Leirosa é constituído por praias baixas arenosas, interrompidas por estruturas artificiais (molhes e esporões).

A sul da embocadura do rio Mondego a evolução da linha de costa foi fortemente influenciada pelas intervenções antrópicas realizadas desde os anos 60 do século passado até aos dias de hoje tais como: construção dos molhes entre 1961-1965; dragagens frequentes na embocadura do porto, regularização fluvial e do estuário, extração de areias junto ao molhe norte; construção de um campo de 5 esporões na Cova Gala, 1 esporão na Costa de Lavos e na Leirosa (1978-1979), (Oliveira et al., 2016); prolongamento do molhe norte da embocadura (2008-2010) e por último a alimentação artificial da praia na Cova Gala (entre 3º e 5º esporão) e para Sul, com estabilização da duna em 2025. O sector compreendido entre o Cabo Mondego e Buarcos encontrava-se em progressivo recuo a partir de 1995, evidenciado pela remoção do prisma arenoso que cobria o substrato rochoso mesozoico (Cunha & Dinis, 1998) resultante do transporte sedimentar associado à ondulação de SW e WSW durante o período de inverno. Este processo provocou a propagação da tendência erosiva para SE (até ao molhe norte). O objetivo deste estudo é avaliar a evolução da linha de costa a norte e a sul da embocadura do rio Mondego, entre 2010 e 2025.

2. METODOLOGIA

Com base em trabalho de campo e levantamentos de perfis transversais *in situ* com registo da linha de maré e largura de faixa de praia, levantamento aéreo por Drone (DJI M30T), análise da carta geológica 19-C, análise de imagens de satélite de média resolução (Sentinel-2) do Programa Copernicus e dados de transeptos (perfil emerso) disponibilizados pelo programa Cosmo 2.0 (APA), permitiram: a) a produção de mapas com as variações de linha de costa entre 2010, 2015 e 2025; b) o conhecimento das alterações da morfologia e volume sedimentar entre 2018 a 2025 a partir da análise dos perfis de praia do Cabedelo e Cova - Gala (perfis de verão e perfis de inverno); c) a evolução deste sector costeiro após a alimentação artificial a sul da embocadura, ocorrida em 2025. Os softwares utilizados foram o ArcGIS Pro 3.6.2 e o Adobe Illustrator.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os ortofotomapas e imagens de satélite analisados permitiram avaliar a tendência evolutiva nos últimos 15 anos (Fig. 1) evidenciando um comportamento consistente com o observado nas últimas décadas. Verifica-se que na faixa costeira em estudo, coexistem sectores com recuos erosivos acentuados, particularmente na praia de Buarcos onde a erosão é muito acentuada para o interior (junto ao Teimoso) e na praia da Cova Gala, bem como sectores com avanços persistentes de linha de costa, nomeadamente entre o Forte de Buarcos e a praia da Claridade. Contudo, verifica-se que a praia

do Cabedelo tem registado um avanço nos últimos 10 anos, assim como a praia da Costa de Lavos a montante do esporão, em contraste com o recuo acentuado observado a jusante e erosão da duna.

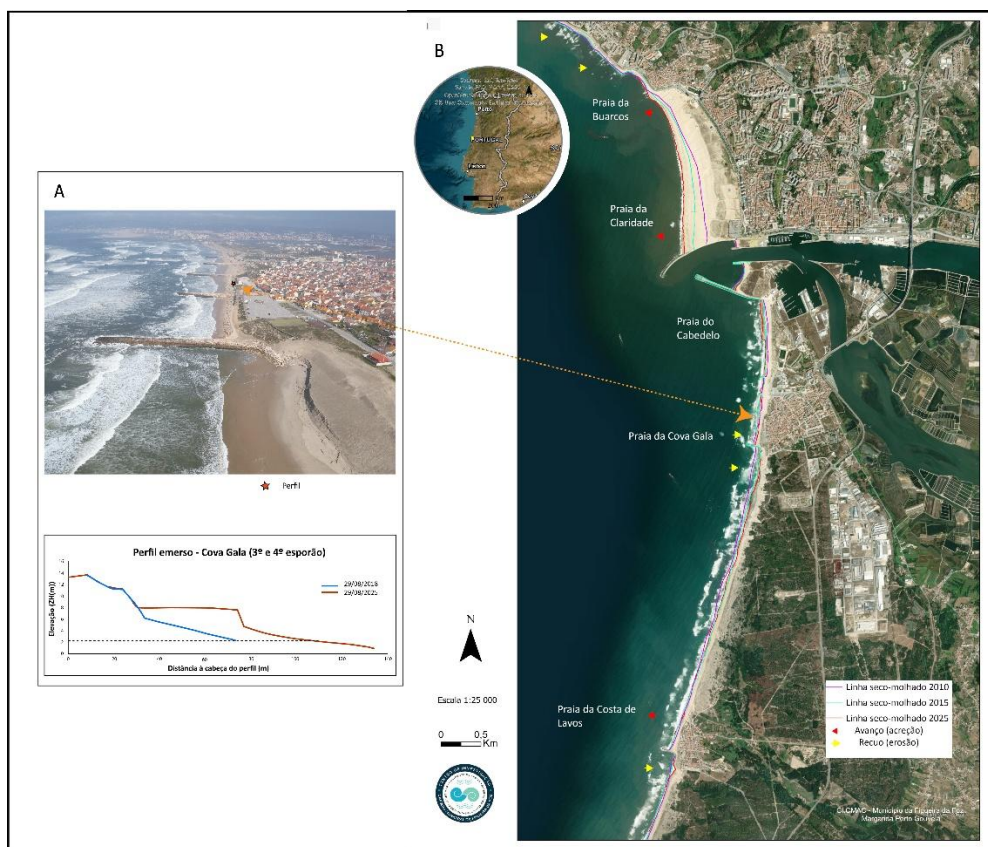


Figura 1. A – Fotografia aérea da linha de costa e localização do transepto na Cova Gala (3º e 4º esporão) e gráfico respetivo com a apresentação dos perfis transversais da praia emersa (agosto de 2018 e 2025) B - Representação da variação das linhas de costa a partir da análise limite seco-molhado, a sul do Cabo Mondego até à praia da Costa de Lavos, nos anos 2010/2015/2025).

Com base nos perfis de praia transversais disponibilizados pelo programa Cosmo 2.0 (APA), para os anos de 2018, 2019, 2020 e 2021, foram comparados perfis da zona emersa na praia do Cabedelo e na praia de Cova Gala e foram calculadas as variações dos volumes sazonais de areias nos troços comuns. O avanço da Praia do Cabedelo reflete o assoreamento junto aos molhes e ao canal do porto, implicando a necessidade de dragagens frequentes para garantir a segurança da navegação.

A diferença de volume de sedimentos na área da secção transversal do troço comum calculada a partir de 2 levantamentos efetuados na praia de Cova Gala em agosto de 2018 e 2025 (durante a transposição de areias pela realimentação) é de 155,45 m³/m linear de costa (regra dos trapézios), tendo a largura de praia aumentado cerca de 59 m em resultado desta intervenção (Fig.1.A).

A praia da Cova Gala evidencia um comportamento morfodinâmico sazonal, caracterizado por alternância de perfis dissipativos no inverno e intermédios a refletivos no verão. Contudo, o inverno rigoroso foi marcado por um “comboio” de tempestades que afetou o litoral português. Este período caracterizou-se por uma forte agitação marítima (ondas de 5-7 m) e por um regime de ondulação gerado por depressões do Atlântico Norte, com direções dominantes no quadrante WNW - NW e episódios de rotação de SW para W e, posteriormente, para NW, acompanhados pelo aumento da energia das ondas (IPMA). Estas condições promoveram a redistribuição sedimentar em ambos os sentidos para a zona imersa, resultando na perda de grande parte da areia transposta na zona emersa

durante a realimentação, no assoreamento junto à barra e numa maior tendência para erosão a norte (Buarcos).

4. CONCLUSÃO

A interação entre forçamentos hidrodinâmicos, disponibilidade sedimentar e intervenções antrópicas constitui o principal fator de controlo da evolução morfossedimentar do setor costeiro em análise. Os molhes portuários promovem a retenção de sedimentos a norte e recuo acentuado a sul. Dada a elevada variabilidade interanual do movimento longitudinal e transversal de sedimentos no litoral, associada aos eventos de tempestade e ao atual défice sedimentar, torna-se fundamental a monitorização contínua das praias com execução de perfis topográficos transversais, análise de imagens de satélite e caracterização do regime de ondulação e de agitação marítima de modo a compreender a evolução da linha de costa e antecipar tendências futuras. Com base neste estudo preliminar, foi identificada a necessidade de instalação de uma estação de monitorização por vídeo na praia da Cova Gala, concebida para recolha sistemática de dados visuais e morfológicos que contribuam para a análise da dinâmica litoral e ao apoio à gestão do risco costeiro, especialmente face aos desafios colocados pela dinâmica do litoral e à intensificação de eventos extremos.

Referências

- Abecasis F., Matias M. F., Carvalho J. J., Vera-Cruz D. (1962). Methods of determining sand and silt movement along the coast, in estuaries and in maritime rivers. Lab. Nac. Eng. Civil. Technical paper nº 186, Lisboa, 25 p.
- André, J.N. (1996). Morfologia litoral da área compreendida entre o Cabo Mondego e S. Pedro de Moel. Tese de mestrado em Geografia, Univ. de Coimbra, 164 pp.
- Cunha, P. & Dinis, J. (1998). A erosão nas praias do Cabo Mondego à Figueira da Foz (Portugal centro-oeste) de 1995 a 1998. *Territorium*. Editora Minerva, Coimbra, 5, p. 31-50.
- Cunha, P. P., Campar, A., Ramos, A., Cunha, L., & Dinis, J. (2006). Geomorphology and coastal dynamics of the Figueira da Foz. *Publicações da Associação Portuguesa de Geomorfólogos*, Vol. IV, APGeom, Lisboa, p.35 – 46.
- Laranjeiro, S.H.C.D. E Oliveira, F.S.B.F. (2003). Assessment of the longshore sediment transport at Buarcos beach (West Coast of Portugal) through different formulations. *Proceedings of CoastGis'03* (Genoa, Italy).
- Oliveira, J. N. C., Oliveira, F. S. B. F., & Teixeira, A. T. (2016). Evolução da linha de costa a sul da embocadura do rio Mondego: modelação do impacte do prolongamento do molhe norte. *Actas das 4as Jornadas de Engenharia Hidrográfica*, Instituto Hidrográfico, Lisboa, 245-248.
- Silva, P. A., Coelho, C., Abreu, T., Baptista, P. R., Bernardes, C., Bouzas, Á. F., Dias, J.M., Pinheiro, L.M., Ferreira, C., Garrido, C., Pereira, C., Pinto, A., Rua, J., Terres Lima, L. & Vaz, N. (2015). Contribuição para o estudo da dinâmica sedimentar na embocadura do Porto da Figueira da Foz, Portugal. *Viii Congresso sobre Planeamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa*, pp. 1-1.
- Vicente, C., Clímaco, M. (1986). Analysis of the evolution of Figueira da Foz beach. *Relatório 106/86 – NET, LNEC*, Lisboa, 51p.

Impactos de tempestades na evolução recente do sistema praia-arriba de Forte Novo (Algarve)

Storm impacts on the recent evolution of the cliff-beach system of Forte Novo (Algarve)

P. Lourenço¹*, B. Rodrigues², C. Loureiro³*

¹ Universidade do Algarve, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Campus de Gambelas, Faro

² Agência Portuguesa do Ambiente, Administração da Região Hidrográfica do Algarve, Rua do Alportel, Faro

³ Universidade do Algarve, Faculdade de Ciências e Tecnologia, CIMA-ARNET, Campus de Gambelas, Faro

* cloureiro@ualg.pt

RESUMO

A evolução conjunta de sistemas de praia-arriba é frequentemente determinada pela função protetora da praia, que pode impedir a ação direta da ondulação na base da arriba. Para investigar a dinâmica dos sistemas praia-arriba em resposta a tempestades, foi monitorizado o litoral de Forte Novo (Algarve), com recurso a ortofotografia digital e a levantamentos topográficos entre 2018 e 2024. Durante o Inverno de 2024/25 a evolução da praia e da arriba caracterizaram-se por erosão acentuada, verificando-se uma correspondência entre o recuo acelerado da arriba e a ocorrência de grupos de tempestades.

Palavras-chave: erosão costeira; arribas; tempestades; drones; realimentação sedimentar

Keywords: coastal erosion; cliffs; storms; drones; sediment nourishment.

1. INTRODUÇÃO

Litorais rochosos compostos por arribas e plataformas rochosas encontram-se presentes em cerca de 50% das zonas costeiras mundiais (Alessio e Keller, 2020). Contudo, em muitos casos os litorais rochosos ocorrem em conjunto com praias arenosas ou de cascalho (Gallop et al., 2020), resultando em ambientes costeiros compostos por sistemas de praia e arriba. Nestes sistemas, tem-se verificado que aumentos episódicos na erosão das arribas estão relacionados com a redução da largura e altura das praias, observando-se que nos setores em que a praia se encontra em erosão o recuo da arriba é também mais rápido e intenso (Sallenger et al., 2002; Nunes et al., 2011). A erosão de sistemas praia-arriba é fortemente controlada pela intensidade da agitação marítima. A capacidade erosiva da ondulação depende das características e energia das ondas, mas os seus efeitos dependem também das características litológicas das arribas que determinam a resistência dos materiais à erosão (Bezerra et al., 2011). Assim, é fundamental compreender os processos e padrões de erosão em litorais rochosos, de forma a proteger pessoas, bens e infraestruturas de eventuais movimentos de massa em arribas (Alessio e Keller, 2020). Em zonas costeiras densamente ocupadas e com elevada atividade turística ao longo de praias e arribas, como no litoral algarvio, é urgente uma melhor compreensão sobre os processos costeiros nos sistemas rochosos (Nunes et al., 2009), uma vez que existe uma crescente exposição humana aos perigos causados pela evolução das arribas (Teixeira, 2021).

Grande parte dos estudos sobre a dinâmica de sistemas de praia-arriba baseia-se na caracterização das taxas de erosão de praias e arribas durante períodos de tempo longos, da ordem de anos a décadas. Para isso, são normalmente integradas imagens aéreas ou de satélite e levantamentos de

campo. Atualmente, com a crescente disponibilidade de equipamentos para monitorização de zonas costeiras, como drones equipados com câmaras de alta resolução, em conjunto com novas técnicas de fotogrametria digital, é possível fazer uma monitorização muito mais detalhada.

Este trabalho tem como objetivo principal apresentar os resultados de um programa de monitorização do sistema praia-arriba em Forte Novo, incluindo a quantificação das taxas de erosão da arriba entre Outubro de 2018 e Março de 2025, bem como a relação entre a evolução da praia e erosão diferencial da arriba em resposta à agitação marítima de tempestade durante o inverno de 2024/25.

2. ÁREA DE ESTUDO E MÉTODOS

O sistema praia-arriba de Forte Novo está situado na freguesia de Quarteira, município de Loulé, Algarve. As arribas neste sector do litoral algarvio são compostas por sedimentos areno-argilosos vermelhos, pouco consolidados e com reduzida resistência à erosão, e a praia, realimentada artificialmente em 2010, apresenta largura variável sendo composta maioritariamente por areia média a grosseira (Nunes et al., 2011). O litoral de Quarteira é densamente ocupado, e imediatamente a oeste de Forte Novo encontra-se o campo de esporões e molhes da marina de Vilamoura e do porto de pesca de Quarteira. Estas estruturas interrompem o transporte sedimentar longilitoral, contribuindo para os processos de erosão costeira na área de estudo.



Figura 1. Localização do sistema praia-arriba de Forte Novo, enquadrado pelas estruturas de proteção costeira de Vilamoura e Quarteira (Imagem de base: OrtoSat 2023-DGT)

A arriba e praia de Forte Novo têm vindo a ser monitorizadas pela Agência Portuguesa do Ambiente com recurso a drones desde 2018. Os levantamentos têm sido realizados com diversos equipamentos, obtendo-se sempre uma cobertura densa de fotografias, a partir das quais foram gerados modelos digitais do terreno e ortofotografias obtidas por fotogrametria digital através do método SfM (Structure from Motion). A precisão posicional e altimétrica foi assegurada por pontos de controlo (GCPs) ou drones com posicionamento RTK-GNSS (Real-Time Kinematic Global Navigation Satellite System). Entre outubro de 2018 e março de 2025 foram realizados 11 levantamentos, sendo que 5 dos quais se realizaram entre setembro de 2024 e março de 2025 de forma a caracterizar a evolução do sistema praia-arriba durante o Inverno de 2024/25. Nestes 5 levantamentos foi também monitorizado o perfil de praia em 4 setores com recurso a um recetor RTK-GNSS, bem como determinada a dureza da arriba em 14 locais ao longo da face da arriba com martelo de Schmidt.

A partir das ortofotografias obtidas nos 11 levantamentos com drones foram vetorizadas manualmente as linhas da crista e base da arriba para cada levantamento. A determinação de diferentes métricas para caracterização da evolução da crista da arriba, incluindo o envelope de variação da linha de costa (SCE – Shoreline Change Envelope) e a taxa de regressão linear (LRR - Linear

Regression Rate), foi realizada com recurso ao programa Digital Shoreline Analysis System (DSAS) versão 6.0, desenvolvido por Himmelstoss et al. (2024). Para aplicação do DSAS estabeleceram-se transeptos perpendiculares à linha da crista da arriba com um espaçamento de 1 m. De forma a analisar especificamente a contribuição da agitação marítima de tempestade para a erosão da arriba de Forte Novo durante o inverno de 2024/25, a análise da variação da crista da arriba foi feita separadamente para o período entre outubro de 2018 e agosto de 2024 e entre setembro de 2024 e março de 2025.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com base na métrica SCE, a crista da arriba de Forte Novo recuou em média 1,09 m durante o período entre 10/2018 e 08/2024, tendo o valor médio de recuo aumentado para 3,96 m durante o Inverno de 2024/25. Para estes dois períodos, o recuo máximo (mínimo) foi de 6,22 (0,08) m e 13,21 (0,47) m, respetivamente, evidenciando uma variação significativa ao longo da arriba de Forte Novo. Durante o primeiro período, a erosão da crista da arriba concentrou-se nos extremos da área de estudo, onde a arriba era mais proeminente, enquanto durante o inverno de 2024/25 o recuo da arriba é mais generalizado, apesar de mais evidente na metade ocidental da área de estudo (Fig. 2).

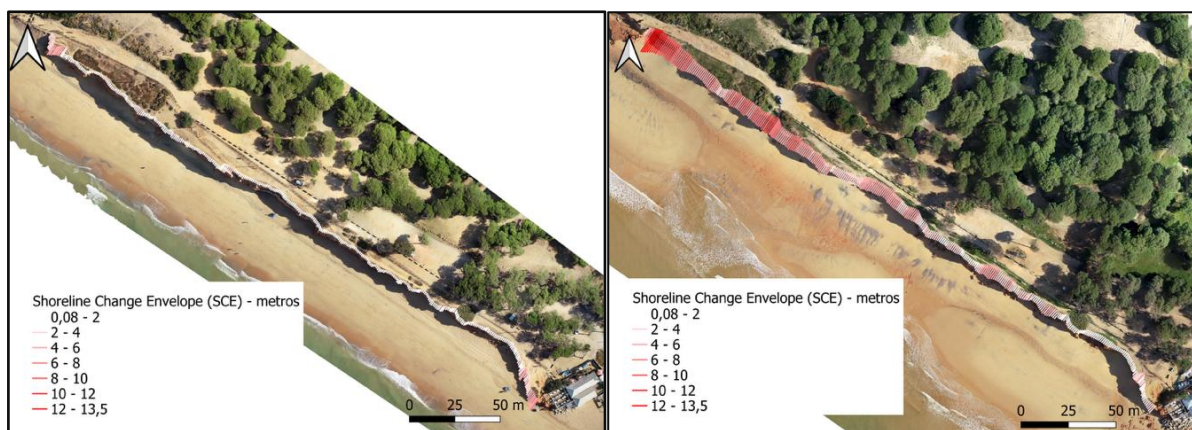


Figura 2. Erosão da crista da arriba de Forte Novo entre Outubro de 2018 e Agosto de 2024 (painel à esquerda - ortofotografia de Setembro de 2024) e entre Agosto de 2024 e Março de 2025 (painel à direita - ortofotografia de Março de 2025).

No que diz respeito às taxas de erosão para a crista da arriba de Forte Novo, estimadas a partir da taxa de regressão linear (LRR), o primeiro período apresenta uma taxa média de 0,01 m/ano. Este valor encontra-se dentro da margem de erro da análise e não é estatisticamente significativo. Durante o período de inverno de 2024/25, a crista da arriba apresentou uma taxa média de erosão de 4,24 m/ano. Face à variabilidade longilitoral do recuo da arriba de Forte Novo, foi analisada a variação da topografia da praia nos 4 perfis topográficos monitorizados, bem como a variação na dureza da face da arriba. Para ambas as variáveis não se verificaram variações relevantes ao longo da praia e da arriba, quer no que diz respeito à largura e altura da praia, quer no que se refere à resistência da arriba, uma vez que os valores de dureza média não apresentam diferenças estatisticamente significativas (média 13,6 e desvio padrão de 2,6 com intervalo de variação nos valores de dureza entre 10 e 20,2).

As diferenças entre os valores médios e a variabilidade longilitoral no recuo da crista da arriba de Forte Novo entre os dois períodos de análise refletem diferentes processos que caracterizam a dinâmica conjunta de sistemas praia-arriba. O aumento considerável da erosão da arriba no inverno de 2024/25 resulta, em primeiro lugar, da erosão cumulativa da praia, que foi perdendo o seu papel de proteção

face à agitação marinha. Após a realimentação artificial realizada em 2010, a praia foi progressivamente reduzindo o seu volume sedimentar, tendo sido estimado por Teixeira (2019) que a longevidade da realimentação atingisse o seu limite em março de 2024. Tal redução é evidenciada pela reduzida largura de praia emersa em setembro de 2024, em que a linha da berma se encontra perto da base da arriba (Figura 2). Assim, existe uma correspondência clara entre o período estimado para a perda de efeito da realimentação de 2010 e o início do recuo acelerado da arriba. Cumulativamente, o Inverno de 2024/25 caracterizou-se por sequências ou grupos de tempestades de elevada intensidade, particularmente entre janeiro e março de 2025, que em vários casos coincidiram com períodos de marés vivas. Neste período, a frequência de condições de ondulação com altura significativa acima de 3 m foi superior em pelo menos 150% em relação aos invernos anteriores desde 2018/19. Tal como observado por Nunes et al. (2011), na ausência de uma praia larga e alta a proteger a arriba de Forte Novo, a erosão da arriba acelera de forma considerável sob a ação de grupos de tempestades, com maiores recuos observados no setor ocidental de Forte Novo.

Apesar de ser ainda necessário avaliar em maior detalhe a evolução conjunta do sistema praia-arriba de Forte Novo, este trabalho fornece elementos fundamentais para caracterizar a variabilidade temporal e espacial no recuo de arriba, quer em termos da sua relação com a evolução da praia pós realimentação, quer em resposta a sequências de tempestades.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Programa COSMO da Agência Portuguesa para o Ambiente pela disponibilização de dados para o litoral de Forte Novo. CL é apoiado pela FCT no âmbito do contrato DOI: 10.54499/CEECINST/00052/2021/CP2792/CT0011, bem com pelo financiamento institucional atribuído ao CIMA (DOI: 10.54499/UID/00350/2025).

Referências

- Alessio, P., & Keller, E. A. (2020). Short-term patterns and processes of coastal cliff erosion in Santa Barbara, California. *Geomorphology*, 353, 106994. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.106994>
- Bezerra, M. M., Moura, D., Ferreira, Ó., & Taborda, R. (2011). Influence of wave action and lithology on sea cliff mass movements in Central Algarve Coast, Portugal. *Journal of Coastal Research*, 27, 162-171. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-11-00004.1>
- Gallop, S., Kennedy, D., Loureiro, C., Naylor, L., Muñoz-Pérez, J., Jackson, D. W. T., Fellowes, T. (2020). Geologically controlled sandy beaches: their geomorphology, morphodynamics and classification. *Science of the Total Environment*, 731, 139123. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139123>
- Himmelstoss, E. A., Henderson, R. E., Farris, A. S., Kratzmann, M. G., Bartlett, M. K., Ergul, A., McAndrews, J., Cibaj, R., Zichichi, J. L., & Thieler, E. R. (2024). Digital Shoreline Analysis System version 6.0: U.S. Geological Survey software release, <https://doi.org/10.5066/P13WIZ8M>.
- Nunes, M., Ferreira, Ó., Schaefer, M., Clifton, J., Baily, B., Moura, D., & Loureiro, C. (2009). Hazard assessment in rock cliffs at Central Algarve (Portugal): A tool for coastal management. *Ocean & Coastal Management*, 52, 506-515. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2009.08.004>
- Nunes, M., Ferreira, Ó., Loureiro, C. & Baily, B. (2011). Beach and Cliff Retreat Induced by Storm Groups at Forte Novo, Algarve (Portugal). *Journal of Coastal Research*, SI64, 795-799.

- Sallenger, A. H.; Krabil, W.; Brock, J.; Swift, R.; Manizade, S. & Stockdon, H. (2002). Sea cliff erosion as a function of beach changes and extreme wave run-up during the 1997-1998 El Niño. *Marine Geology*, 187, 279-97. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(02\)00316-X](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(02)00316-X)
- Teixeira, S. B. (2019). Beach nourishment as a coastal management solution to mitigate soft cliff erosion on Quarteira coast (Algarve-Portugal). In *Proceedings of the 5a Conferência sobre Morfodinâmica Estuarina e Costeira - MEC2019*. Lisbon, Portugal, pp. 33-34.
- Teixeira, S. B. (2021). Reducing sea cliffs hazard in pocket beaches through beach nourishment. *Journal of Integrated Coastal Zone Management*, 21, 215-226. <https://doi.org/10.5894/rgci-n378>

Coastal Geomorphological Features on the Middle Pliocene Limestone Wave-Cut Platform at Sagres, SW Portugal

Geoformas costeiras da plataforma calcária de erosão marinha do Pliocénico médio em Sagres, Sudoeste de Portugal

S. Abbasi^{1*}, P. Cunha¹, A. Gomes², A. Martins³, D. Moreno⁴

¹ Universidade de Coimbra, MARE - Centro de Ciências do Mar e do Ambiente / ARNET - Rede de Investigação Aquática, Earth Sciences Dep. - FCTUC, Coimbra, Portugal

² CEGOT- Centre of Studies in Geography and Spatial Planning, Faculty of Arts and Humanities of Porto, University of Porto, Portugal

³ ICT – Institute of Earth Sciences, Department of Geosciences, University of Évora, Portugal

⁴ CENIEH ESR Laboratory, Burgos, España

* Corresponding author: uc2025161649@student.uc.pt

Abstract

At Sagres (SW Portugal), the middle Pliocene limestone wave-cut platform preserves a wide variety of coastal landforms. This study provides a field-based characterization of this ancient and elevated marine erosion surface, focusing on the lithological properties of the limestone bedrock and on the morphology and spatial distribution of erosional features, bioerosion borings, and potholes. The observed distribution of these features indicates that platform development was controlled by the combined influence of bedrock lithology, structural discontinuities, wave dynamics, and associated coastal processes.

Key-words: *Sagres, rocky coast, wave-cut platform, Middle Pliocene, erosional landforms; bioerosion*

Palavras-chave: *Sagres, costa rochosa, plataforma de erosão marinha, Pliocénico Médio, formas erosivas, bioerosão*

1. INTRODUCTION

The southwestern coast of Portugal is characterized by an extensive and elevated littoral platform (Fig. 1A), which develops along the Atlantic-facing sector of the Portuguese western margin (Ramos-Pereira & Ramos, 2020; C. Moura et al., 2020). Within this broader geomorphological setting, the southern sector between Cape São Vicente and Sagres is underlain predominantly by carbonate rocks, including Jurassic limestone units locally interbedded with less resistant calcarenites (Manuppella & Perdigão, 1972; Rocha et al., 1979, Ribeiro, 2005).

This study aims to characterize the uplifted relict limestone wave-cut platform in the Sagres coastal area. Particular emphasis is placed on field observations, GPS-based georeferencing, and the detailed characterization of the morphology and spatial distribution of its geomorphological features, as well as on assessing the influence of lithological variability on coastal landform development.

2. STUDY AREA

The study area encompasses the Sagres promontory (Fig. 1C), where coastal karst morphology is dominated by an extensive Middle Pliocene wave-cut platform situated at approximately 30–40 m

a.s.l. and terminating seaward in vertical cliffs up to 43 m high (Fig. 2A). In the most exposed sectors, particularly along the west-facing coast, the cliffs are steep to near-vertical and generally lack substantial debris accumulations at their base, indicating intense wave action and efficient removal of fallen material. By contrast, more sheltered sectors preserve local accumulations of collapsed blocks at the cliff foot.

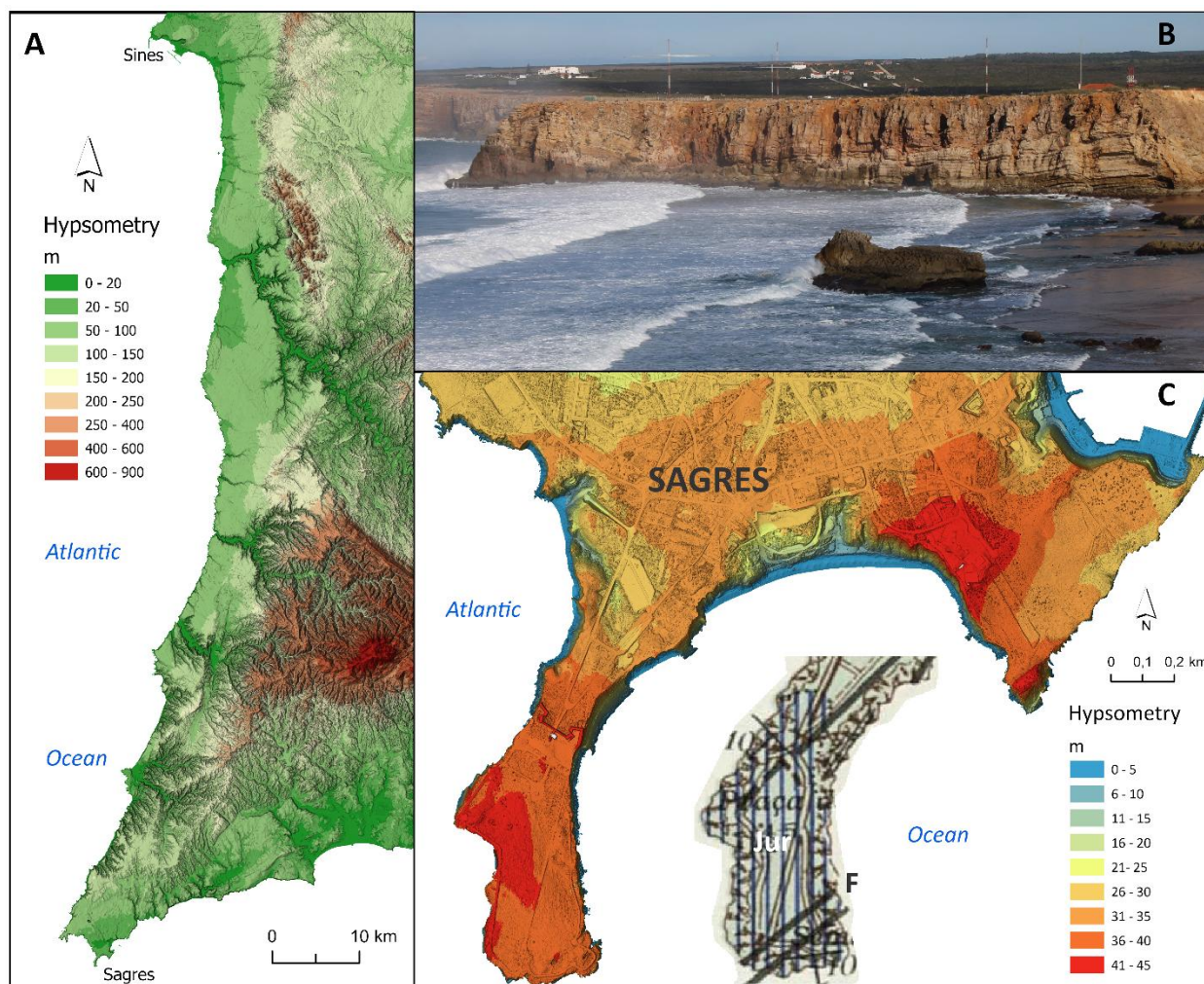


Figure 1. Location and geomorphological setting of the study area at Sagres, southwestern Portugal: A) Location of the Sagres promontory within mainland Portugal; B) General view of the elevated limestone wave-cut platform and the steep sea cliffs that delimit it along the Atlantic coast; C) Digital terrain model of the Sagres promontory, showing the spatial configuration and elevation of the platform; the inset presents an extract from Geological Map Sheet 51-B (Vila do Bispo): Jur – Jurassic carbonate rocks, F – faults.

3. METHODOLOGY

The study employed field-based geomorphological surveys based on direct observation and the systematic identification, description, and analysis of landforms developed on the ancient wave-cut platform. Particular attention was given to their morphology and spatial distribution. Morphological classification criteria were established to distinguish small-scale elements, specifically bioerosion structures and abrasion depressions (potholes), based on their inferred formation processes. At the same time, the lithological variability was documented alongside the description of surface siliciclastic deposits to assess the influence of the geological substrate on the geomorphic expression of the wave-cut surface.

4. RESULTS AND DISCUSSION

At Sagres, the wave-cut platform attributed to the Middle Pliocene forms a broad and relatively continuous surface developed on resistant limestone bedrock (Fig. 2A). It occupies the uppermost geomorphic level of a staircase of marine terraces and ranges from sub-horizontal to gently sloping. Despite its regional continuity, the platform displays lateral variations in elevation, surface regularity, and degree of preservation, with smooth sectors alternating with more irregular and locally dissected areas. These variations are spatially associated with lithological contrasts: resistant limestone units generally support more continuous and regular surfaces, whereas less resistant calcarenitic beds are characterized by greater surface irregularity and reduced morphological continuity.

Several small-scale geomorphological features were identified on the exposed limestone surface, including relatively smooth abrasion surfaces, irregular microrelief associated with carbonate dissolution, and numerous small rounded to cylindrical cavities interpreted as bioerosion borings (Fig. 2C).



Figure 2. Geomorphological and sedimentary features of the Middle Pliocene limestone wave-cut platform at Sagres. A) general view of the elevated platform and the steep sea cliffs that delimit it seaward; B) irregular limestone surface with circular depressions interpreted as pothole-like features; C) rounded to cylindrical bioerosion borings developed in the exposed limestone; D and E) sandy siliciclastic sediment preserved within a bedrock depression; and representative coarse fraction of the overlying siliciclastic deposits, comprising sand, granules, and rounded pebbles.

Circular depressions, interpreted as pothole-like features (Fig. 2B), were also observed and are likely related to the combined action of water movement and sediment abrasion. The morphology, density, and preservation of these features vary across the platform, contributing to the heterogeneity of the wave-cut surface. However, the origin of some depressions remains uncertain, as similar forms may

result from the combined effects of abrasion, dissolution, and subaerial weathering (Moura et al., 2020; Morales, 2022). Locally, the wave-cut platform is overlain by thin and discontinuous siliciclastic deposits (Fig. 2D e E). These deposits consist predominantly of sand, with locally preserved well rounded pebbles. Their grain-size characteristics and roundness are compatible with a coastal sandy depositional environment (Morales, 2022), although sediment texture alone is insufficient to confirm a marine origin. Nevertheless, the assemblage of all landforms is characteristic of carbonate rocky coastal environments where wave action interacts with resistant bedrock (Lace & Mylroie, 2013).

5. CONCLUSION

The elevated Middle Pliocene marine platform at Sagres forms a broad, sub-horizontal, and relatively regular wave-cut surface developed on resistant carbonate bedrock. Its morphology and preservation reflect lithological contrasts and differential resistance to coastal erosion. These lithological contrasts are expressed in the present-day morphology through variations in platform continuity, slope morphology, and resistance to erosion. The wave cut platform preserves a diverse assemblage of coastal geomorphological features whose morphology and distribution vary across the study area. This field-based study provides a preliminary geomorphological characterization and establishes a basis for future mapping, interpretation, and comparison with other neighboring elevated coastal surfaces.

Funding

Financial support for this study was provided through a doctoral scholarship under the reference 2025.04614.BD (Samira Abbasi), but also with the support of UID/04292/2025 granted to MARE – Marine and Environmental Sciences Centre, and LA/P/0069/2020 (DOI: <https://doi.org/10.54499/LA/P/0069/2020>) granted to the Associate Laboratory ARNET.

References

- Lace, M. J., & Mylroie, J. E. (Eds.). (2013). Coastal karst landforms. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-5016-6>
- Manuppella, G., & Perdigão, J. (1972). Carta geológica de Portugal na escala 1:50 000: Folha 51-B, Vila do Bispo [Mapa geológico]. Serviços Geológicos de Portugal.
- Morales, J. A. (2022). Coastal geology. Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-96121-3>
- Moura, D., Oliveira, S. & Boski, T. (2020). The rocky coast of western Algarve. Landscapes and Landforms of Portugal (pp. 117-124). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-03641-0_9
- Ramos-Pereira, A. & Ramos, C. (2020). The southwest coast of Portugal. Landscapes and landforms of Portugal (pp. 109-115). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-03641-0_8
- Ribeiro, C. A. S. (2005). Evolução diagenética e tectono-sedimentar do Carixiano da região de Sagres, bacia algarvia. Tese de doutoramento, Universidade de Évora. <https://dspace.uevora.pt/rdpc/handle/10174/11303>
- Rocha, R. B., Ramalho, M. M., Manuppella, G., Zbyszewski, G., & Coelho, A. V. P. (1979). Carta geológica de Portugal na escala 1:50 000: Notícia explicativa da Folha 51-B, Vila do Bispo. Serviços Geológicos de Portugal.

Alongshore variability in morphological response to a sequence of extreme storms at Castelejo beach

Variabilidade longilitoral na resposta morfológica a uma sequência de tempestades extremas na praia do Castelejo

H. Epping^{1,2}, V. Kümmerer^{2,3}, C. Loureiro^{2*}

¹ TH Lübeck, Department of Architecture and Civil Engineering, Lübeck, Germany

² Universidade do Algarve, Faculdade de Ciências e Tecnologia, CIMA-ARNET, Campus de Gambelas, Faro

³ Instituto Dom Luiz, Universidade de Lisboa, Campo Grande, Lisboa

* cloureiro@ualg.pt

ABSTRACT

This study investigates the morphological response to a sequence of extreme storms at Castelejo beach, a rock-bounded and sediment-limited embayed beach. Four high-resolution topographic surveys were performed to monitor pre-, and post-storm beach morphology during a 3-week period characterized by multiple storm events. Results reveal strong vertical erosion at the northern sector, exposing rock platforms and causing dune ramp scarping, while the central part of the beach evidenced minor accretion. The alongshore-variable morphological responses are found to be modulated by the geological framework.

Keywords: Embayed beaches; Storm groups; Beach morphology; Extreme waves.

Palavras-chave: Praias encastradas; Grupos de tempestades; Morfologia de praia; Ondulação extrema.

1. INTRODUCTION

Storm events are major drivers of morphological changes in exposed beaches. These morphological changes can be confidently predicted for sediment-rich coastlines, given that these systems have been extensively surveyed and data used for development and validation of morphodynamic models (Sherwood et al., 2022). However, there is a general lack of high-resolution observations of storm responses on sediment-limited, rock-bound embayed or pocket beaches, where the response to storms is often alongshore variable (Loureiro et al., 2014; Kümmerer et al., 2024). This knowledge gap limits the current understanding of how the geological framework influences beach response to storms, including sequences or clusters of intense storms. This work aims to explore the impacts of a sequence of energetic storms on the rock-bound Castelejo beach in the SW coast of Portugal and analyse the morphodynamic processes leading to alongshore variability in morphological response.

2. STUDY AREA AND METHODS

Castelejo Beach comprises a 500 m-long, northwest-facing sandy coastal stretch at the western coast of the Algarve, constrained by headlands, cliffs and rock outcrops (Figure 1). This coastline experiences a mesotidal regime and is exposed to high-energy wave conditions with energetic winter storms (Costa e Esteves, 2010). During winter storms, significant wave heights (H_s) often exceed 5 m during periods of several days along the western Algarve coast, resulting in strong wave action during high-tide that can drive extensive beach erosion (Loureiro et al., 2012).

To monitor storm impacts, four detailed topographic surveys were performed between 22/01/2026 and 09/02/2026 in order to characterise the variation in beach morphology along the embayment. Surveys were performed using a Trimble R2 Differential Global Navigation Satellite System in Real-Time Kinematic mode, with a horizontal and vertical precision of 1 cm and 2 cm, respectively. For each survey, 13 cross-shore profiles spaced 25 m apart were monitored. In addition to the topographic surveys, sediment samples were collected along profiles 11, 7 and 3, and nearshore waves were recorded using 3 pressure transducers located in the northern, central and southern sectors of the beach during a full tidal cycle. Survey data was processed in QGIS and Matlab to compute a range of morphological and volumetric change metrics, as well as obtain nearshore wave spectral parameters.

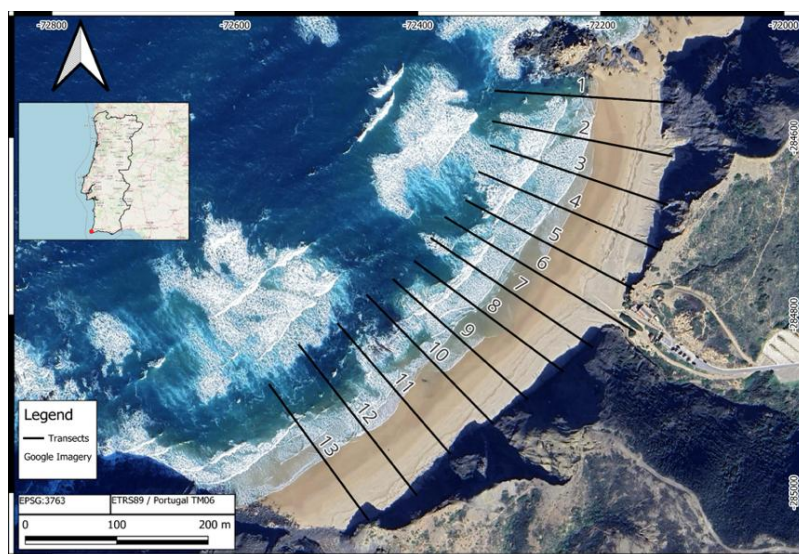


Figure 1. Aerial view of Castelejo beach, in the western coast of the Algarve, with the location of the 13 profiles monitored during the topographic surveys.

3. RESULTS

The dedicated surveying campaign began in late January, and by then minor winter erosion had already taken place during mild storms in December and January. However, over a period of 18 days between late January and early February, a sequence of extreme storms impacted the western Portuguese coast. The first event, storm Harry, produced the most extreme wave conditions, with H_s reaching 8 m on the 24th of January (Figure 2). This short-lived storm was followed by storm Kristin on the 28th of January, with H_s in excess of 7.5 m but with a longer storm peak. Finally, storm Leonardo reached the coast on the 2nd of February and lasted until the 8th of February. While H_s during this storm was lower, this storm was characterised by a very long duration and coincided with a spring tide cycle (Figure 2).

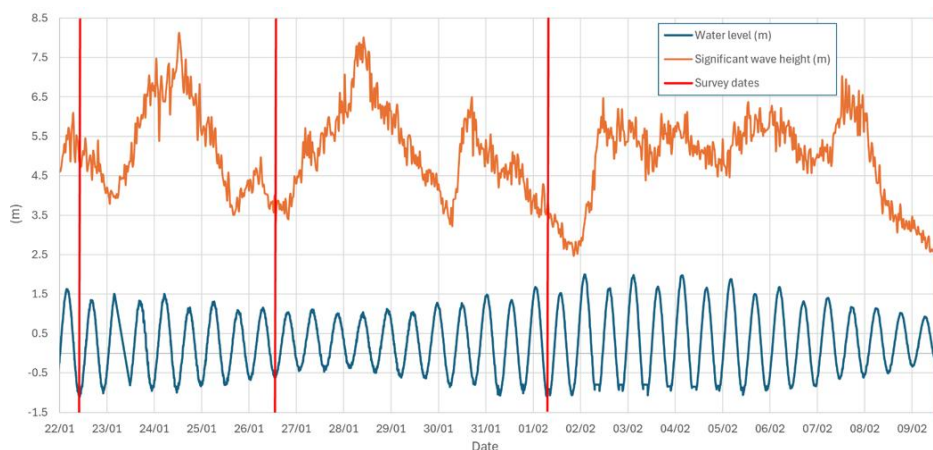


Figure 2. Offshore significant wave height recorded at Sines wave buoy and water level from Lagos tide gauge.

In terms of morphological changes, the impacts of storm Harry were limited despite the extreme wave conditions (Figure 3). However, erosion was more significant during storm Kristin, which drove extensive beach lowering of the beach in the northern sector of Castelejo. Storm Leonardo intensified the erosional response, contributing to further lowering of the intertidal beach, which became depleted of sediments in the northern sector of the beach, exposing the underlying bedrock surfaces. Besides lowering of the intertidal beach, erosional responses were also characterized by extensive scarping of dune ramps that had accumulated against the cliffs in the northern sector of the beach (Figure 4).

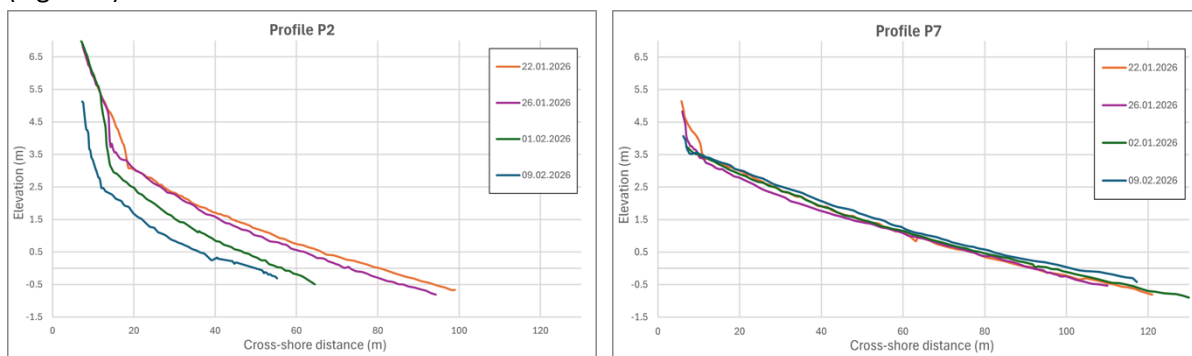


Figure 3. Morphological changes observed between 22nd of January and 9th of February at Profile 2 (left panel) and Profile 7 (right panel).



Figure 4. View of the upper beach at Profile 2 looking to the south (east to the left and west to the right of the pictures) on the 22nd of January (left panel) and on the 9th of February (right panel).

Beach erosion primarily occurred along the southern and northern limits of the beach, while accretion was observed in the central section (Figure 5). Volumetric loss reached up to 90 m³/m in the northern sector, even though erosion of the cliff toe led to partial collapse of the cliff face that resulted in an accretional signal at the upper beach. This loss in beach volume in the northern sector occurred cumulatively in response to the sequence of storm events, but with different patterns between the various profiles (Fig. 7). Intense wave forcing during spring high tides resulted in elevated total water levels that triggered complete erosion of small dunes in the southern section of the beach. In contrast, the central area experienced minor accretion over the survey period, with limited volumetric variation between storm events and positive net volume change (+8 m³/m at profile 7).

4. DISCUSSION

The morphological response of Castelejo beach to a sequence of energetic storm events displays spatially variable patterns with large alongshore differences. In the northern section the erosional response is progressive, with each event contributing to sediment loss across the beach profiles (e.g. P2 and P3), but in other parts of the beach the erosional response is muted (e.g. P10), or dominated by a single event (e.g. P4). This alongshore variability is strongly modulated by the geological framework, with net volumetric loss observed in areas where underlying rock surfaces are shallower and more prevalent. Despite the proximity and partial sheltering by the northern headland, the erosional response was higher in the northern sector of the beach, while the more exposed central sector experienced minor accretion. The opposing morphological response to a sequence of extreme events along this embayment suggests that erosion is controlled by the development of headland controlled cellular circulation, observed under extreme wave forcing in other shallow embayments in the western Algarve (Loureiro et al., 2012).



Figure 5. Net volume change during the survey period and absolute volumes per survey along the 13 cross-shore profiles surveyed at Castelejo.

Acknowledgements

This study was supported by national funds through FCT, under the institutional grants to the Associate Laboratory ARNET (LA/P/0069/2020), CIMA (<https://doi.org/10.54499/UIDP/00350/2020>) and University of Algarve (<https://doi.org/10.54499/CEECINST/00052/2021/CP2792/CT0011>).

References

- Costa, M., Esteves, R. (2010). Clima de agitação marítima na costa oeste de Portugal Continental. Atas das XI Jornadas Técnicas de Engenharia Naval— O Sector Marítimo Português. Edições Salamandra, Lisboa, pp. 413–426.
- Kümmerer, V., Ferreira, Ó., Loureiro, C. (2024). Distinct shoreline behaviour along storm-dominated and geologically controlled coastal barriers. *Earth Surface Processes and Landforms*, 50 (4), e70042. <https://doi.org/10.1002/esp.70042>
- Loureiro, C., Ferreira, Ó., Cooper, J. A. G. (2012). Extreme erosion on high-energy embayed beaches: Influence of megarips and storm grouping. *Geomorphology*, 139-140, 155–171. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.10.013>
- Loureiro, C., Ferreira, Ó, Cooper, J.A.G. (2014) Non-uniformity of storm impacts on three high-energy embayed beaches. *Journal of Coastal Research*, SI 70, 326–331. <https://doi.org/10.2112/SI70-055.1>
- Sherwood, C.R., van Dongeren, A., Doyle, J., Hegermiller, C.A., Hsu, T-J., Kalra, T.S., Olabarrieta, M., Penko, A.M., Rafati, Y., Roelvink, D., van der Lugt, M., Veeramony, J., Warner, J.C. (2022). Modeling the Morphodynamics of Coastal Responses to Extreme Events: What Shape Are We In? *Annual Reviews of Marine Science*, 14, 457-492. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-032221-090215>

Ebb-tidal Delta Shoal Migration and Updrift Attachment Observed through Satellite-Derived Bathymetries

Migração e fixação de bancos de areia num delta de vazante observadas através de batimetrias obtidas por satélite

V. Kümmerer^{1,2 *}, V. Fanti^{1,2}, J. Santos², P. Cabrita², S. Costas²

¹ Universidade do Algarve, Instituto Dom Luiz, Faro, Portugal

² Universidade do Algarve, Centro de Investigação Marinha e Ambiental (CIMA/ARNET), Faro, Portugal

* vkummerer@ualg.pt

ABSTRACT

In order to better understand the processes that lead to the elongation of the Culatra Barrier Island, the migration of the ebb-tidal delta shoals at the Armona inlet (Ria Formosa, Portugal) was monitored using yearly Sentinel-2 satellite-derived bathymetries (2016–2025), which were calibrated using in situ high-resolution surveys. Shoals formed around 300 m offshore, migrated onshore, and welded to the shoreline in 2023 to 2024 adjacent to the anchoring point of the delta to the island. This confirms hypothesised shoal attachment as a sediment pathway to the Culatra barrier spit elongation.

Keywords: Shoal migration; satellite imagery; barrier spit; coastal morphodynamics; shoreline bulges

Palavras-chave: Migração de bancos de areia; imagens de satélite; restinga; morfodinâmica costeira; saliências da linha de costa

1. INTRODUCTION

Ebb-tidal deltas can have a significant impact on the local coastal sedimentary budget, regulating sand exchange between estuaries or lagoons and the open coast and also trapping sediment transport. While their general cyclic morphodynamic behaviour has been well described conceptually (e.g., FitzGerald et al., 2000), there is a limited number of observations to verify the morphological processes and evolution at high spatial and temporal resolution.

Morphological data derived from openly available satellite imagery provides the opportunity to better understand coastal morphodynamics anywhere with relative high frequency (monthly to seasonal). Recent advances in satellite-derived bathymetry (SDB) algorithms (e.g., Monteys et al., 2025) have further extended these capabilities by enabling repeated monitoring of nearshore morphological change, provided that some data for calibration exist. This makes it possible to track the evolution of morphological features such as the migration of nearshore sandbars. This study uses the analysis of openly available satellite imagery to monitor shoal migration on an ebb-tidal delta platform and subsequent updrift welding to the adjacent barrier spit in Culatra Island, southern Portugal.

2. STUDY AREA

The Armona ebb-tidal delta is located between the Culatra and Armona barrier islands in the Ria Formosa system in southern Portugal (Figure 1). The wave climate in this area is bidirectional and dominated by waves from the west (approximately 70%), resulting in eastward net sediment transport (Garel et al., 2019). The mean significant wave height is approximately 1 m, with a mean wave period of 8 s. The semi-diurnal tides have a meso-tidal spring tidal range of 2.8 m.

The Armona inlet functioned as the primary inlet of the Ria Formosa barrier system until the opening and stabilisation of the updrift Faro–Olhão inlet in the mid-20th century. This led to a reduction in the Armona inlet's tidal prism and consequently its ebb-delta size (Pacheco et al., 2011). At the same time, the Culatra barrier spit elongated through the formation of multiple sand spits at a rate of ~50 m/year (Kombiadou et al., 2019).

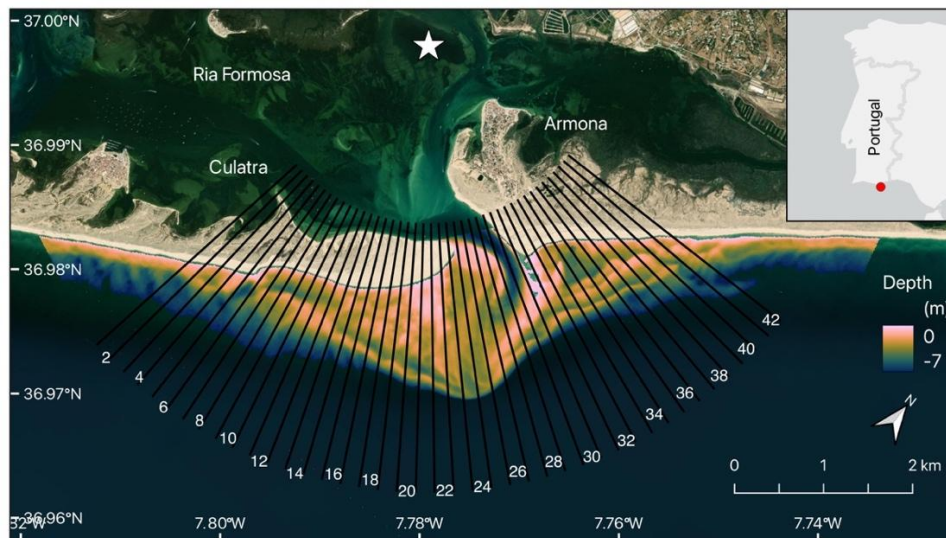


Figure 1. Armona ebb-tidal delta located between the Culatra and Armona barrier islands (Ria Formosa, Portugal). The map shows the 2024 satellite-derived bathymetry (SDB), the transect locations, and the origin of the polar coordinate system (white star), overlaid on the Esri World Imagery basemap.

3. DATA & METHODS

To capture shoal migration and their attachment to the shoreline, time series of SDBs of the Armona ebb-tidal delta between 2016 and 2025 were estimated based on a machine learning algorithm and multi-scene approach adapted from Monteys et al. (2025). Sentinel-2 imagery was downloaded between 01-09 and 01-12 for each year of the period between 2016 and 2025. The filtering of the images included an initial screening based on (1) tidal levels at the satellite fly-over time, in order to capture high-tide conditions (above 0.5 m, msl), and (2) the application of Lyzenga's SDB model, whereby only the six images with the highest coefficient of determination (R^2) (above 0.7) were kept, rendering additional image filtering unnecessary. The SDB model was trained with in-situ bathymetric (training) datasets from 2018, 2019 and 2020 (COSMO, <https://cosmo.apambiente.pt>). Further SDB model optimisation included a multi-scene approach that composites the scenes from the best scene combination, which was determined through iteration and the lowest mean absolute error (MAE). Finally, to create a time series of SDB spaced yearly between 2016 and 2025, the model coefficients from the three calibration years were averaged and applied to the composite image for each year. The resulting SDBs were validated against the COSMO bathymetry (validation) dataset using the root-mean-square error (RMSE) and MAE metrics. Shoal migration and evolution on the ebb-tidal platform were assessed through conformal mapping to polar coordinates (Pearson et al., 2022) as ebb-tidal deltas tend to evolve following a circular pattern around the inlet. The net morphodynamic variability was assessed by calculating the variance of the ten SDBs for each grid cell.

4. RESULTS

The predicted SDBs show a strong agreement with the in-situ bathymetric observations (Figure 2a) with RMSE and MAE ranging between 0.26 m to 0.35 m and 0.19 m to 0.26 m, respectively. The low error in the SDB prediction enables the detection and characterisation of the shoal movement at the

updrift flank of the ebb-tidal delta, with matching observed and predicted ebb-tidal delta profile evolution between 2018 and 2020 (Figure 2b). However, while the general shape of the shoal morphology is well represented the predicted bed elevations show disagreements to observations, especially in deeper water.

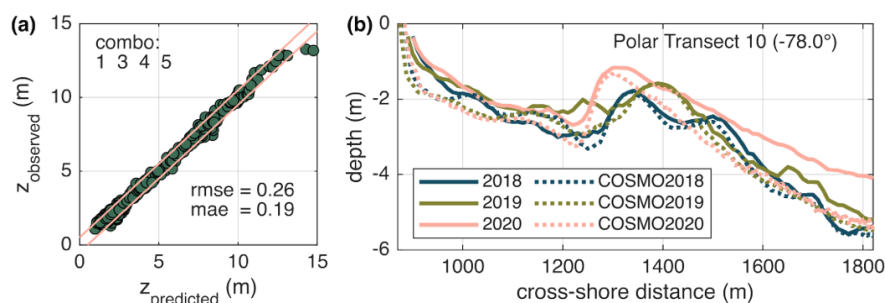


Figure 2. Validation of SDB. (a) Depths (z) derived from the best combination of multi-scene SDB (predicted) and in-situ bathymetric data (observed) for the year 2018. Diagonal lines display the ± 0.5 m error range. The combo refers to the scene combination resulting in the lowest MAE. (b) Example SDB polar transect profile (full lines) and in-situ (COSMO) data (dotted lines).

Increased morphological variability, indicated through higher variance, can be observed at the anchoring point of the ebb-tidal delta, which is located at the updrift flood channel throat (Figure 3a, between transect 4 and 6). Shoals form ~ 300 m offshore at this location and, after increasing in width and height, migrate onshore towards the shoreline (Figures 3b, c). Following this onshore migration, a welding phase was identified between 2023 and 2024 (Figure 3b, c), resulting in the formation of a shoreline bulge (Figure 3a, transect 4-5), as confirmed by observed shoreline changes (not shown).

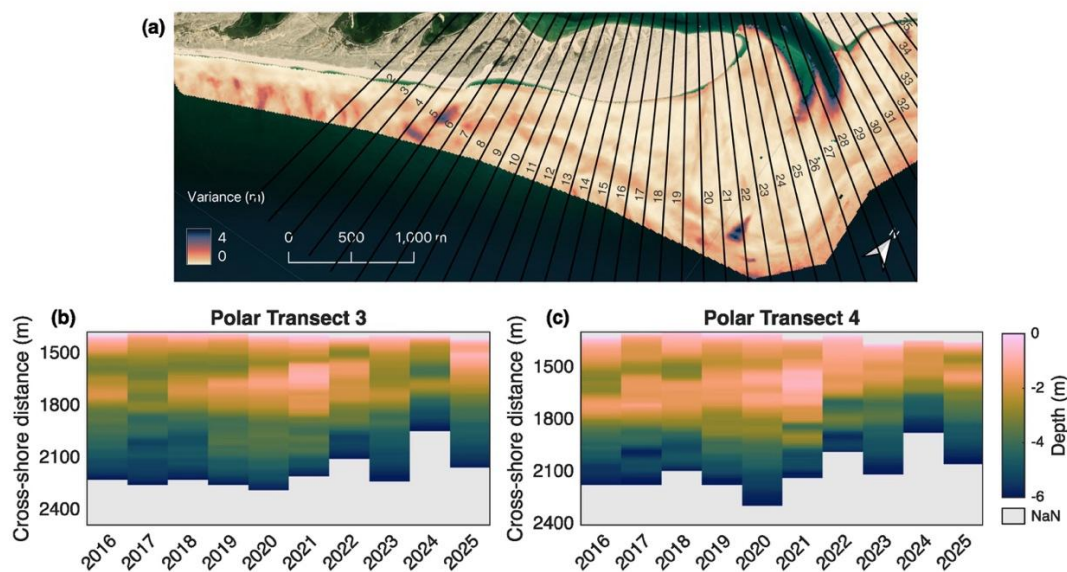


Figure 3. (a) Morphological variability between 2016 and 2025 indicated by the variance across the 10 SDBs. (b,c) Hovmöller diagram of cross-shore profile changes at transect 3 (b) and transect 4 (c) of the yearly SDB products.

5. DISCUSSION

The growth of sand spits is mainly attributed to longshore transport and updrift sandbar attachment (Costas and FitzGerald, 2011). It has been hypothesised that the decrease in size of the Armona ebb-tidal delta, related to a reduction in its tidal prism, is the main source of sediment contributing to the elongation of the Culatra barrier spit (Pacheco et al., 2011). However, the mechanism by which sediment from the ebb-tidal delta is transported to the barrier spit remains unclear. Analysis of the

SDBs shows that shoals migrate onshore and attach to the updrift flank of the ebb-tidal delta, forming shoreline bulges. The attached sediment can then be transported alongshore, contributing to the ongoing elongation of the barrier spit.

Preliminary results from a shoreline change assessment suggest that several cycles of bulge formation have occurred, possibly resulting from a similar process of shoal attachment from the ebb-tidal delta as documented here. Thus, analysis of the SDBs provides further evidence that the Armona ebb-tidal delta supplies sediment to the Culatra barrier spit via the process of shoal attachment. While this process appears to be partly driven by morphological self-organisation, the role of storms remains to be investigated.

6. CONCLUSIONS

Yearly SDB products derived from Sentinel-2 (2016–2025) capture ebb-delta shoal dynamics at Armona inlet with sufficient accuracy (RMSE < 0.35 m, MAE < 0.26 m) to resolve meaningful morphological change. Variance and transect analyses show a recurring sequence: shoals form near the updrift channel throat near the ebb delta lobe, widen, migrate onshore, and weld to the updrift shoreline. These observations strengthen the interpretation that the Armona ebb-tidal delta contributes to Culatra barrier spit growth via episodic shoal attachment followed by alongshore redistribution.

Acknowledgements

This work is a contribution to the research project CREST (DOI: 10.54499/2022.05392.PTDC), Associate Laboratory ARNET (LA/P/0069/2020) and Research Unit CIMA (UID/00350/2025) through Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT).

References

- Costas, S., FitzGerald, D., 2011. Sedimentary architecture of a spit-end (Salisbury Beach, Massachusetts): The imprints of sea-level rise and inlet dynamics. *Marine Geology* 284, 203–216. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2011.04.002>.
- FitzGerald, D.M., Kraus, N.C., Hands, E.B., 2000. Natural Mechanisms of Sediment Bypassing at Tidal Inlets. Vicksburg: USACE Research and Development Center, pp. 1–12.
- Garel, E., López-Ruiz, A., Ferreira, Ó., 2019. A method to estimate the longshore sediment transport at ebb-tidal deltas based on their volumetric growth: Application to the Guadiana (Spain–Portugal border). *Earth Surf Processes Landf* 44, 2557–2569. <https://doi.org/10.1002/esp.4679>.
- Kombiadou, K., Matias, A., Ferreira, Ó., Carrasco, A.R., Costas, S., Plomaritis, T., 2019. Impacts of human interventions on the evolution of the Ria Formosa barrier island system (S. Portugal). *Geomorphology* 343, 129–144. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.07.006>.
- Monteys, X., Isler, T., Casal, G., Gallagher, C., 2025. Improving Satellite-Derived Bathymetry in Complex Coastal Environments: A Generalised Linear Model and Multi-Temporal Sentinel-2 Approach. *Remote Sensing* 17, 3834. <https://doi.org/10.3390/rs17233834>.
- Pacheco, A., Ferreira, Ó., Williams, J.J., 2011. Long-term morphological impacts of the opening of a new inlet on a multiple inlet system. *Earth Surf Processes Landf* 36, 1726–1735. <https://doi.org/10.1002/esp.2193>.
- Pearson, S.G., Elias, E.P.L., Van Prooijen, B.C., Van Der Vegt, H., Van Der Spek, A.J.F., Wang, Z.B., 2022. A novel approach to mapping ebb-tidal delta morphodynamics and stratigraphy. *Geomorphology* 405, 108185. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2022.108185>.

Morphosedimentary Dynamics Of The Sandy Coast Of Essaouira (Morocco): Multi-scale Analysis And Monitoring

Dinâmica morfossedimentar da costa arenosa de Essaouira (Marrocos): análise e monitorização em várias escalas

A. Khouz^{1,2,3*}, J. Trindade^{1,2,4}, T. El Bchari⁵, B. Bougadir⁶

¹ Centre for Functional Ecology, Universidade Aberta; Rua da Escola Politécnica, n.º 147, Lisboa, Portugal.

² TERRA Associate Laboratory; Instituto Superior de Agronomia, Tapada da Ajuda, Lisboa, Portugal.

³ InterDisciplinary Applied Research Laboratory - LIDRA, International University of Agadir - Universiapolis, Agadir, Morocco

⁴ Centre of Geographical Studies, Institute of Geography and Spatial Planning, University of Lisbon; R. Branca Edmée Marques, Lisboa, Portugal;

⁵ Department of Earth Sciences, Polydisciplinary Faculty of Safi, Cadi Ayyad University, Marrakech, Morocco.

⁶ Interdisciplinary Research Laboratory in Environment, Management, Energy, and Tourism (LIREMET), Essaouira Higher School of Technology, Cadi Ayyad University, Marrakech, Morocco ;

* abdellah.khouz@gmail.com

ABSTRACT

This study examines the morphosedimentary evolution of the sandy coastline of Essaouira Province through an integrated regional and local-scale approach. Multi-temporal shoreline analysis (1975–2020) using the Digital Shoreline Analysis System reveals dominant erosion trends, with localized accretion influenced by geomorphological features and coastal structures. Field monitoring using differential GPS and sediment analysis highlights seasonal variability and sediment redistribution processes. The results indicate that sediment deficit and interruptions in littoral drift strongly control coastal dynamics. These findings provide valuable insights for coastal management and erosion mitigation.

Keywords: coastal erosion; DSAS; shoreline change; sediment dynamics; morphodynamics; Essaouira

Palavras-chave: erosão costeira; DSAS; dinâmica da linha de costa; dinâmica sedimentar; Essaouira

1. INTRODUCTION

Sandy coastlines constitute highly dynamic environments with major ecological, economic, and social importance (Vousdoukas et al. 2020). These systems are continuously shaped by the interaction between marine hydrodynamics, sediment supply, and geomorphological constraints (Snedden et al. 1999). However, they are increasingly vulnerable to coastal erosion due to both natural variability and human-induced pressures (Khouz et al. 2022). In this context, understanding shoreline evolution and quantifying rates of coastal change are essential for assessing risks and supporting coastal management strategies.

The position of the shoreline is commonly used as a key indicator of coastal dynamics. Its temporal variability allows the identification of erosion and accretion trends over different time scales. The estimation of shoreline change rates depends on the statistical methods applied, each relying on specific assumptions regarding shoreline displacement through time. The Digital Shoreline Analysis System (DSAS) provides a standardized framework for this purpose, enabling the calculation of several widely used indicators, including Shoreline Change Envelope (SCE), Net Shoreline Movement (NSM),

End Point Rate (EPR), and Linear Regression Rate (LRR). These methods allow the quantification of shoreline variability either as distances or rates of change, depending on the temporal resolution of the available data (Thieler et al., 2009).

Beyond long-term analysis, short- to medium-term coastal monitoring is essential to better understand the processes controlling beach morphodynamics. Field-based approaches, such as differential Global Positioning System (dGPS) surveys, provide high-resolution data on beach profile evolution and enable the detection of seasonal variations and storm-induced changes. When combined with sedimentological analyses, these measurements offer valuable insights into sediment redistribution processes and the response of coastal systems to hydrodynamic forcing.

In this study, the sandy coastline of Essaouira Province is investigated through a multi-scale approach combining remote sensing analysis and in situ monitoring. At the regional scale, multi-temporal aerial imagery is used to reconstruct shoreline evolution over several decades and to quantify erosion and accretion rates using DSAS. At the local scale, detailed monitoring of Tagharte Beach is conducted using dGPS surveys and grain size analyses to characterize seasonal variability and sediment dynamics. This integrated methodology aims to provide a comprehensive understanding of the morphosedimentary behaviour of the study area and to identify the main factors controlling its evolution.

The objectives of this study are to:

- Quantify long-term shoreline evolution along the Essaouira coast
- Analyse morphosedimentary processes at regional and local scales
- Identify the main drivers of coastal erosion and accretion

2. METHODS

The methodology adopted in this study integrates remote sensing techniques, Geographic Information System (GIS) analysis, and field-based measurements to investigate coastal dynamics at multiple scales. Multi-temporal aerial photographs (1975, 1985, 1991, 2009, 2016 and 2020) were georeferenced and mosaicked in a GIS environment. Shorelines were digitised using the landward vegetation line as a proxy, chosen for its relative detectability in the available imagery and its reduced sensitivity to tidal stage compared with instantaneous waterlines; however, this proxy may shift with dune/vegetation dynamics and therefore introduces additional positional uncertainty. DSAS was then used to compute shoreline-change statistics along shore-normal transects generated from a user-defined baseline (transect spacing: 50 m; transect length: 500 m), following standard DSAS practices (Himmelstoss et al., 2021). Shoreline positional uncertainty, combining georeferencing error (± 3 m), digitising error (± 2 m), and proxy-related uncertainty (± 10 m), was estimated based on established methodologies (Crowell et al., 1991; Boak & Turner, 2005) and propagated into DSAS rate calculations. Rates were reported using the EPR for interval-to-interval comparisons and LRR / WLR (Weighted Linear Regression) to summarise multi-date trends while accounting for heterogeneous shoreline uncertainties.

At the local scale, detailed monitoring was conducted at Tagharte Beach over a one-year period (from April 2021 to February 2022). Eighteen cross-shore profiles (P1–P18; Figure 1) were surveyed using differential GPS. Surveys were conducted at a seasonal frequency, and after major storm events when possible. Beach-volume change was estimated by integrating elevation differences between successive surveys over a defined alongshore extent (3.13 km) and cross-shore limits from backshore marker to -2 m depth contour, using TIN interpolation at 1 m resolution. Sediment samples were collected at 3 positions per profile across the backshore–intertidal gradient and analysed by laser diffraction granulometer, reporting D50, sorting (σ), and modality. Finally, GIS-based analysis was used to classify

shoreline segments into erosion and accretion zones and to assess the spatial variability of coastal changes across the study area.



Figure 1. Location of the profiles in the Essaouira beach.(1: Morocco, 2: Marrakech Safi region, et 3: Essaouira province)

3. RESULTS AND DISCUSSION

DSAS results for 1975–2020 show a predominance of shoreline retreat along the Essaouira sandy coast. Sector A exhibits the strongest recession, reaching a maximum NSM of -34 m (corresponding to an EPR of approximately -0.76 m·yr $^{-1}$ over 45 years). Moderate retreat occurs in Sector D (NSM up to -13 m; ~ -0.29 m·yr $^{-1}$) and Sector E (NSM up to -10 m; ~ -0.22 m·yr $^{-1}$). Localised erosion is also detected in Sector C near the Essaouira ramparts, consistent with field observations. Across all transects, around 66% show negative EPR values, indicating that erosion is spatially widespread but heterogeneous. Accretion is limited and spatially clustered. The southern part of Sector A shows the highest progradation (NSM up to $+25$ m; $\sim +0.56$ m·yr $^{-1}$), whereas Tagharte Beach (Sector D) exhibits only minor advance (NSM $\sim +1.1$ m; $\sim +0.02$ m·yr $^{-1}$). These patterns highlight strong alongshore variability in shoreline behaviour (Figure 2).

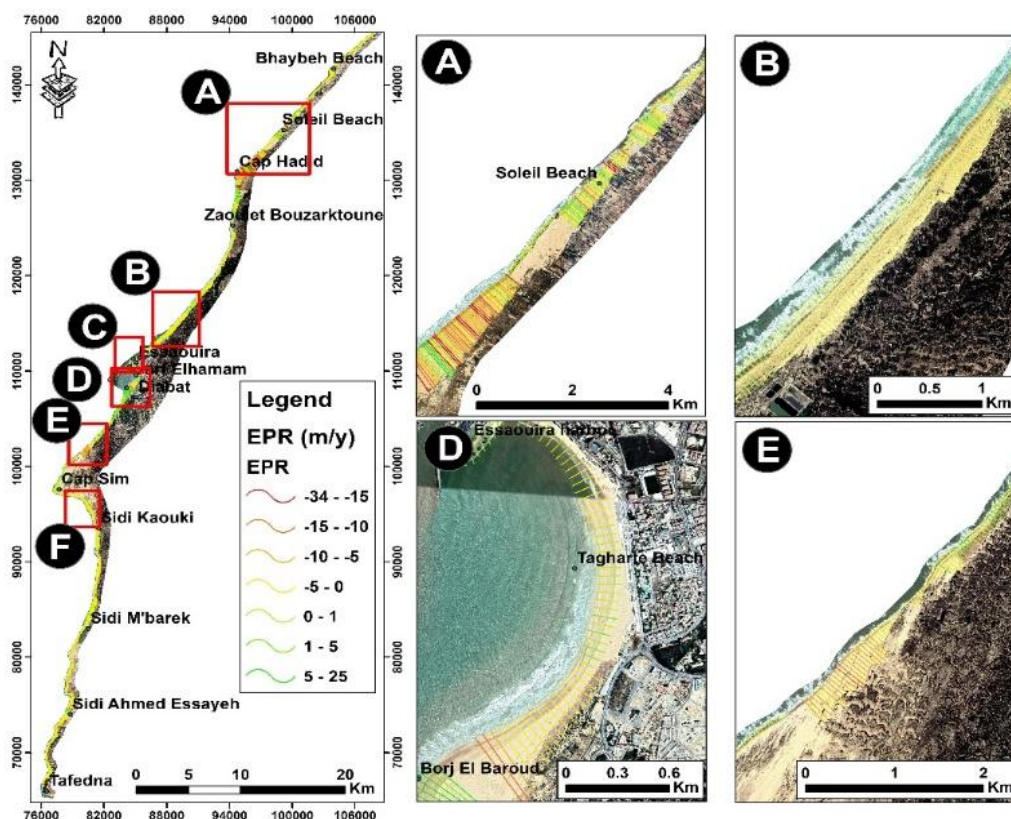


Figure 2. Diachronic variation with EPR in the Essaouira province sandy coast.

The sediment budget along the coastline is primarily controlled by a combination of natural and anthropogenic factors. A reduction in sediment supply is inferred and is consistent with upstream river regulation (including dam construction), which can reduce downstream sediment delivery. Although direct river-sediment time series are not available within this study, the observed alongshore erosion patterns align with a sediment-deficit scenario. In addition, littoral drift is disrupted by geomorphological features such as Cap Hadid, Cap Sim, and Cap Tafelney. Furthermore, coastal infrastructure, including the harbour of Essaouira and Mogador Island, acts as physical barriers that interfere with sediment transport processes. Together, these factors likely reduce alongshore sediment redistribution and contribute to the observed erosion hotspots, particularly where transport pathways are constrained by headlands and coastal structures. Field monitoring at Tagharte Beach indicates a general increase in sediment volume during the observation period, suggesting temporal variability in sediment budget conditions. Sedimentological analysis shows that the beach is composed predominantly of medium to coarse sands with unimodal grain size distributions. Significant spatial variability in grain size was observed, particularly within the intertidal zone, reflecting the influence of hydrodynamic processes. A clear longshore differentiation is evident, with finer sediments located near Mogador Island due to reduced wave energy, while coarser sediments are found in more exposed sections of the beach. The analysis of the storm event that occurred in December 2021 demonstrates its significant impact on coastal morphology. Between the pre-storm survey on 23-Dec-2021 and the post-storm survey on 27-Dec-2021, the December 2021 event produced marked erosion and landward migration of elevation contours. Net volume change over the monitored sector (1.13 km; cross-shore limits: [-1.65 – 1.80 MSL]) was estimated at $-59\,209\text{ m}^3$. These findings emphasize the critical role of extreme hydrodynamic events in shaping short-term coastal evolution and highlight their contribution to sediment redistribution processes.

4. CONCLUSIONS

The sandy coastline of Essaouira Province shows a predominant erosional trend driven mainly by hydrodynamics, sediment transport, and sediment deficit. While human activities have a limited influence at the regional scale, they can locally enhance erosion, especially near coastal structures. Seasonal variations and storm events further affect sediment redistribution. Given its recreational and economic importance, Tagharte Beach remains highly vulnerable, highlighting the need for continuous monitoring and sustainable sediment management strategies.

References

- Khoulz, A., Trindade, J., Oliveira, S. C., et al. (2022). Landslide susceptibility assessment in the rocky coast subsystem of Essaouira, Morocco. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 22, 3793-3814.
- Boak, Elizabeth H., and Ian L. Turner (2005). Shoreline definition and detection: a review. *Journal of Coastal Research* 21.4: 688-703.
- Crowell, M., Stephen P. Leatherman, and Michael K. Buckley (1991). Historical shoreline change: error analysis and mapping accuracy. *Journal of Coastal Research* : 839-852.
- Himmelstoss, Emily A., et al. 2021. Digital shoreline analysis system (DSAS) version 5.1 user guide. No. 2021-1091. US Geological Survey.
- Snedden, J. W., & Dalrymple, R. W. (1999). Modern shelf sand ridges: from historical perspective to a unified hydrodynamic and evolutionary model. *SEPM Special Publication*.
- Thieler, E. R., Himmelstoss, E. A., Zichichi, J. L., & Ergul, A. (2009). Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0—An ArcGIS extension for calculating shoreline change. U.S. Geological Survey.
- Vousdoukas, M. I., Ranasinghe, R., Mentaschi, L., Plomaritis, T. A., Athanasiou, P., Luijendijk, A., & Feyen, L. (2020). Sandy coastlines under threat of erosion. *Nature climate change*, 10(3), 260-263.

Dinâmica da largura de praia em Porto Santo derivada de imagens de satélite: sazonalidade e migração longilitoral

Beach width dynamics in Porto Santo derived from satellite imagery: seasonality and longshore migration

A.N. Silva^{1,2 *}, D. Pais^{3,4}, C. Ponte Lira^{3,5}, A.P. Bastos^{3,4}

¹ Centro de Estudos Geográficos - Instituto de Geografia e Ordenamento do Território, Universidade de Lisboa; Lisboa, Portugal

² Laboratório Associado TERRA; Lisboa, Portugal

³ Instituto Dom Luiz, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Portugal

⁴ Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, Portugal

⁵ Instituto Português do Mar e da Atmosfera; Lisboa, Portugal

* amasilva@edu.ulisboa.pt

RESUMO

Este estudo analisa a variabilidade espaciotemporal da largura da praia do Porto Santo (2017–2026) com base em imagens Landsat e Sentinel-2 e processamento com CoastSat e DSAS. Os resultados revelam forte controlo sazonal na resposta à agitação marítima, com recuo generalizado associado a tempestades e recuperação estival. Identifica-se ainda migração longitudinal no setor central C junto ao Cabeço da Ponta, sugerindo influência da direção das ondas locais na redistribuição sedimentar.

Palavras-chave: *Dinâmica costeira; Indicadores morfodinâmicos; Detecção remota; CoastSat; Praias insulares*

Keywords: *Coastal dynamics; Morphodynamic indicators; Remote sensing; CoastSat; Insular beaches*

1. INTRODUÇÃO

As praias arenosas são sistemas costeiros altamente dinâmicos, resultantes da interação entre transporte sedimentar e forçamento hidrodinâmico variável. A monitorização da sua evolução é essencial para caracterizar a variabilidade espaciotemporal da linha de costa, identificar tendências erosivas ou acrecionárias e compreender padrões sazonais relevantes para a gestão costeira. Em contextos insulares, onde a disponibilidade sedimentar é limitada e a exposição ao forçamento oceânico é elevada, esta monitorização torna-se particularmente relevante. Localizada no Arquipélago da Madeira, Portugal, a praia do Porto Santo, pela sua importância social, económica e ambiental, constitui um caso de estudo crítico.

O regime de agitação marítima é dominado por ondas do quadrante NW, com altura significativa média de 2.4 m e período de pico de 10.6 s. Observa-se forte sazonalidade, com condições mais energéticas no inverno marítimo, associadas a ondulação atlântica de NW–WNW, e menor energia no verão, caracterizado por maior dispersão direcional e um regime bimodal que combina ondulação de NW com ondas de menor período geradas localmente de NNE (Silva et al., 2019).

Neste enquadramento, o presente trabalho avalia a variabilidade espaciotemporal da posição da linha de água, utilizada como *proxy* da largura de praia, com base em imagens de satélite (Landsat e Sentinel-2). Adicionalmente, analisa-se a capacidade destas imagens óticas para capturar variações sazonais. O

estudo centra-se na identificação de padrões sazonais de mobilidade da posição da linha de costa na baía do Porto Santo (Fig. 1).

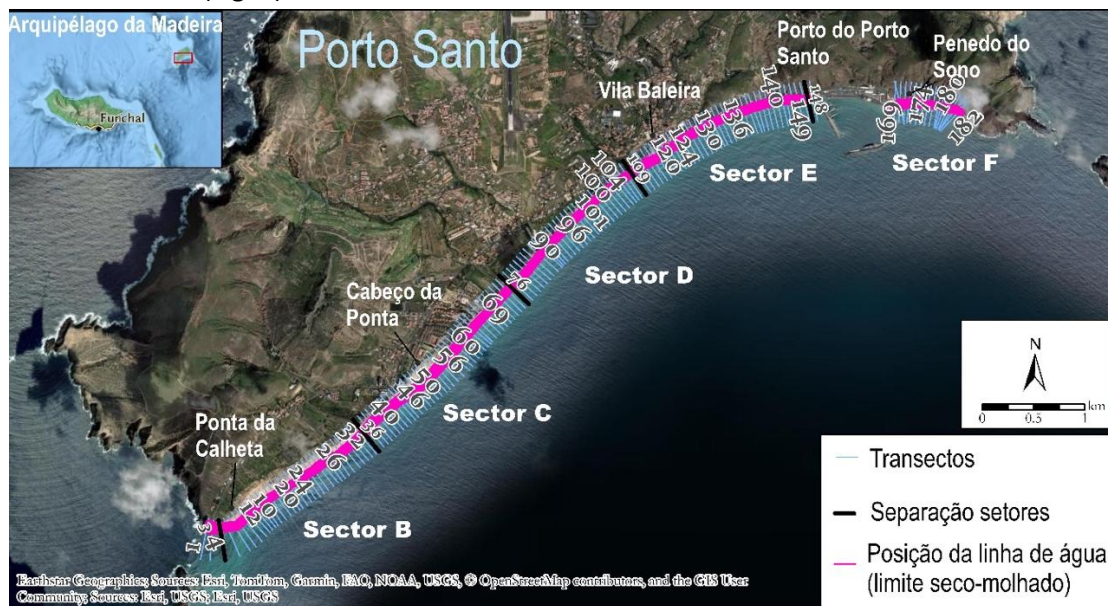


Figura 1. Praia do Porto Santo com transectos DSAS (50 m de espaçamento) e linhas de água (CoastSat) utilizadas para estimativa da largura de praia; setores de análise B–F indicados.

2. DADOS E MÉTODOS

A variabilidade espaciotemporal da largura da praia do Porto Santo foi analisada com base em linhas de costa derivadas de imagens multiespectrais dos satélites Landsat-8/9 (OLI) e Sentinel-2 (MSI), adquiridas entre janeiro de 2017 e março de 2026, garantindo uma cobertura temporal adequada à análise de variabilidade sazonal e interanual.

A linha de água foi delineada automaticamente com a ferramenta *CoastSat* (Vos et al., 2019), recorrendo à classificação dos pixels baseada no índice MNDWI (Modified Normalized Difference Water Index) com limiar adaptativo por imagem, determinado automaticamente pelo método de Otsu, que maximiza a variância entre os pixels de água e areia. Foram apenas consideradas imagens com cobertura de nuvens inferior a 50%.

A análise quantitativa da variação da linha de água foi realizada com o *Digital Shoreline Analysis System* (DSAS) (Henderson et al., 2026), através de 164 transectos perpendiculares à linha de costa, espaçados 50 m e definidos a partir de uma *baseline*. Para cada transecto, a distância entre a *baseline* e a linha de água foi usada como proxy da largura de praia.

As séries temporais foram convertidas em anomalias relativamente à mediana de cada transecto, permitindo a comparação normalizada da variabilidade espacial. Os dados foram posteriormente agregados em base trimestral, considerando-se a média das anomalias por transecto, de forma a reduzir a variabilidade associada a efeitos instantâneos do nível do mar (maré e agitação) e a destacar padrões recorrentes de redistribuição sedimentar. A análise das anomalias foi realizada nas componentes espacial e temporal (2017–2026), com o objetivo de caracterizar padrões de variabilidade intra e interanual.

O enquadramento com o forçamento oceanográfico foi feito com dados do modelo ERA5 obtido a partir do *Copernicus Climate Change Service* (C3S), extraídos para um ponto ao largo da ilha (33.5°N, 16.5°W), considerando altura significativa, período médio e direção média das ondas. O critério de tempestade adotado corresponde a um limiar de altura significativa de 5.15 m, associado a uma probabilidade de não excedência de 97.5% (Andrade et al., 2017).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados evidenciam uma variabilidade significativa da largura de praia ao longo do período analisado, fortemente controlada pelo forçamento oceanográfico sazonal e por padrões espaciais diferenciados ao longo da baía (Fig. 2). Nos anos de 2017, 2018, 2019, 2022, 2024 e 2025 observam-se anomalias negativas generalizadas, coincidentes com períodos de elevada frequência de tempestades (Fig. 3), sugerindo uma mobilização sedimentar transversal na praia (entre praia emersa e submarina) associada a reduções globais da largura de praia. Em sentido oposto, verifica-se um aumento progressivo e relativamente consistente da largura de praia entre junho de 2019 e setembro de 2021, e novamente em 2025 (Fig. 2). Esta tendência estará associada a períodos menos energéticos, permitindo a recuperação e acumulação sedimentar na zona emersa da praia, que se mantém com uma persistência mais alargada, ao longo de vários trimestres incluindo nos períodos de inverno.

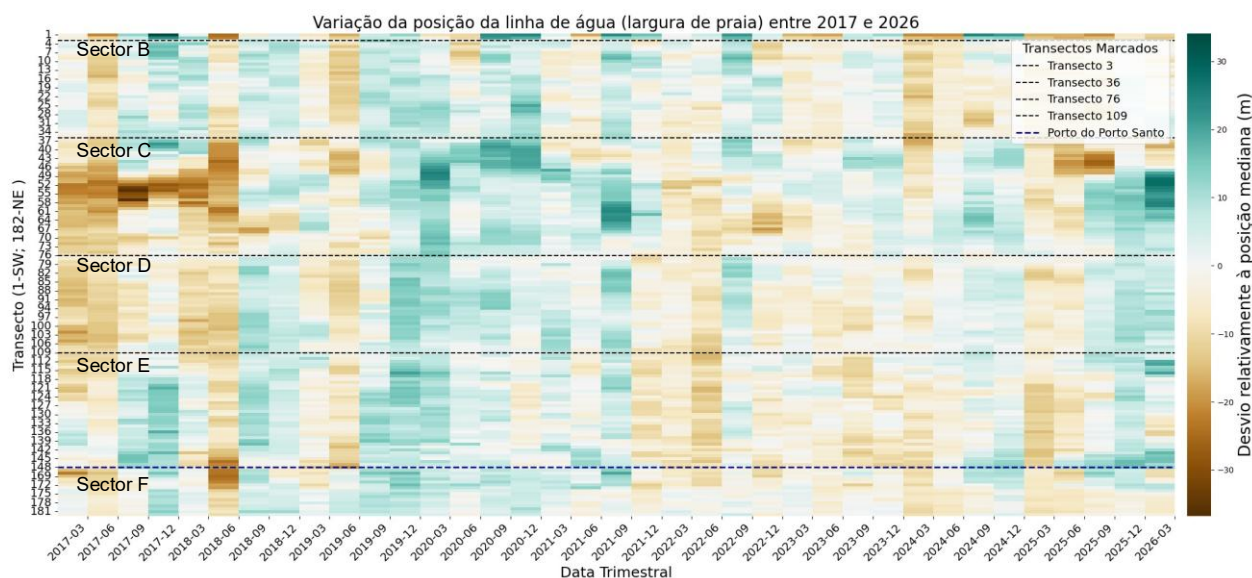


Figura 2. Variação da largura de praia ao longo da baía entre 2017 e 2026. Tons esverdeados indicam larguras de praia superiores à mediana, e tons acastanhados indicam larguras menores; a intensidade da cor representa a magnitude dos desvios (m). As linhas tracejadas horizontais assinalam transectos de referência que separam os sectores B–F considerados (espacialização dos sectores na Fig. 1).

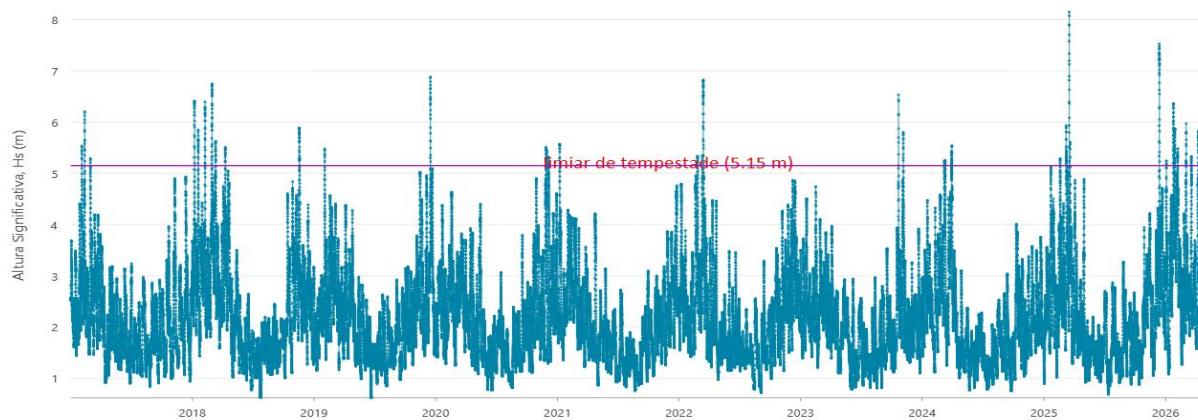


Figura 3. Altura significativa de onda (Hs), ao largo, no período 2017–2026 (Copernicus Climate Change Service (2025): ERA5 hourly time-series data on single levels from 1940 to present - 33.5°N, 16.5°W).

Os diferentes setores da baía, definidos em função da variabilidade da sua largura, apresentam comportamentos diferenciados, destacando-se o setor C por uma dinâmica espacial mais complexa e variável ao longo do período de análise. Entre junho de 2019 e setembro de 2021 observa-se uma

migração longitudinal progressiva da região de maior largura de praia. Inicialmente, esta encontra-se centrada no transecto T55, na zona do cabeço da Ponta, deslocando-se para SW junto ao T38 entre junho de 2019 e setembro de 2020, num padrão de propagação no sentido NE–SW. Numa fase subsequente, verifica-se uma inversão no sentido de propagação, com o máximo de largura de praia a deslocar-se no sentido NW para junto do T67 (entre setembro 2020 e setembro de 2021) naturalmente associada a um forçamento local dominante em direção oposta ao período anterior. Nos restantes setores, os padrões de migração longitudinal não são tão evidentes, predominando uma resposta sazonal mais típica ao longo da baía.

4. CONCLUSÕES

Os resultados preliminares sugerem que o comportamento de diminuição e aumento generalizado da largura de praia poderá estar associado a processos predominantemente transversais, envolvendo transferência de sedimento da zona emersa para a zona submersa da praia durante eventos mais energéticos, seguido de eventual recuperação em condições mais energias reduzidas. Por outro lado, os episódios de migração longitudinal sugerem uma influência mais marcada da direção da agitação marítima local na redistribuição sedimentar ao longo da baía.

Os padrões observados sugerem a necessidade de uma análise mais detalhada do regime de agitação marítima nos períodos críticos identificados, com especial enfoque na direção local das ondas. Em particular, importa avaliar de forma mais discriminada os episódios associados à redução generalizada da largura de praia, bem como aqueles em que se observa migração longitudinal da variabilidade espacial.

Agradecimentos

Este trabalho foi apoiado por fundos públicos portugueses através da FCT - Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P, pela Unidade de Investigação UID/00295/2025 (DOI <https://doi.org/10.54499/UID/PRR/00295/2025>). APB e DP são financiados por bolsas de doutoramento atribuídas pela FCT, I.P. com as referências 2025.05352.BD (<https://doi.org/10.54499/2025.05352.BD>) e 2022.13776.BDANA (<https://doi.org/10.54499/2022.13776.BDANA>), respetivamente

Referências

- Andrade, C., Taborda, R., Ribeiro, M., & Silva, A. N. (2017). Estudo da dinâmica sedimentar da praia do Porto Santo. Instituto Dom Luiz da Universidade de Lisboa. (Relatório técnico não publicado).
- Henderson, R. E., Farris, A. S., Kratzmann, M. G., Bartlett, M. K., Ergul, A., McAndrews, J., Cibaj, R., Zichichi, J. L., Himmelstoss, E. A., & Thieler, E. R. (2026). Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 6.1 [Software release]. U.S. Geological Survey. <https://doi.org/10.5066/P1NHMJNC>.
- Silva, A. N., Taborda, R., Andrade, C., & Ribeiro, M. (2019). The future of insular beaches: Insights from a past-to-future sediment budget approach. *Science of The Total Environment*, 676, 692-705. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.228>.
- Vos K., Splinter K.D., Harley M.D., Simmons J.A., Turner I.L. (2019). CoastSat: a Google Earth Engine-enabled Python toolkit to extract shorelines from publicly available satellite imagery. *Environmental Modelling and Software*. 122, 104528. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.104528> (Open Access).
- Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). URL: <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-single-levels-timeseries> - Accessed on 28-Apr-2026.

Assessing the Relationship Between Watersheds and Coastal Cells Along the Moroccan Atlantic Coast

Avaliação Da Relação Entre Bacias Hidrográficas E Células Costeiras Ao Longo Da Costa Atlântica De Marrocos

A. Elmimouni^{1*}, K. Elhadiri¹, O. Larchim¹, F. Toufik¹, S. Charik¹

¹ Cadi Ayyad University, FLSH, Department of Geography, Laboratory of Geomorphology, Environment and Society, Rue Amarchich, Marrakech, Morocco.

* a.elmimouni@uca.ac.ma

ABSTRACT

The coastal cell concept was introduced by Inman and Chamberlain (1960) as a primary analytical framework for interpreting the spatial and temporal evolution of coastlines. In this study, we apply this framework to a segment of the Moroccan Atlantic coast extending from the Tensift Valley (in the north of Morocco) to the Saguia el-Hamra Valley (in the south). By delineating specific sedimentary cells within this region, we intend also to propose sustainable management strategies that integrate these natural geomorphic units into long-term coastal planning and protection efforts.

Keywords: *Watershed, Sedimentology, Coastal Cells, Atlantic Coast, Morocco*

Palavras-chave: *Bacia de drenagem, Sedimentologia, Células Litorais, Costa Atlântica, Marrocos*

1. INTRODUCTION

Spanning over 3,500 km across both the Mediterranean and Atlantic shores, the Moroccan coastline represents a vital socio-economic frontier. For over half a century, the country has experienced a continuous and accelerating migration of economic activity from the interior toward the coast. Today, Morocco's maritime infrastructure is highly sophisticated, encompassing 43 ports (Fig. 1) : 14 dedicated to international trade, 22 to commercial fishing, and 7 serving as marinas. Collectively, this network features 73 km of breakwaters and 65 km of berthing facilities, yielding an annual capacity of 300 million tonnes—including 11.2 million twenty-foot equivalent units (MTEU) for containers—and accommodating 15.2 million passengers (Ministry of Equipment and Water, 2023).

However, capitalizing on these coastal opportunities often occurs in contexts where baseline scientific data remains insufficient, inadvertently risking unpredictable economic and environmental repercussions. To mitigate these challenges, there is a critical need to expand the foundational knowledge required to implement Integrated Coastal Zone Management (ICZM) frameworks that respect inherent environmental constraints. Achieving this necessitates robust, comprehensive studies that transcend isolated, sector-by-sector approaches. Instead, resolving these systemic issues demands multidisciplinary, integrated action plans rooted fundamentally in the holistic concept of the coastal cells.

The "coastal cell" concept was adopted in 1960 by Inman and Chamberlain through their foundational research on the Southern California coastline. Their study established that coastal zones could be

subdivided into distinct coastal cells units, each characterized by a self-contained cycle of sediment transport. A complete sedimentary cycle within these cells typically comprises:

- Sources: primarily fluvial inputs from watersheds providing the bulk of the sediment load.
- Sinks: submarine canyons.

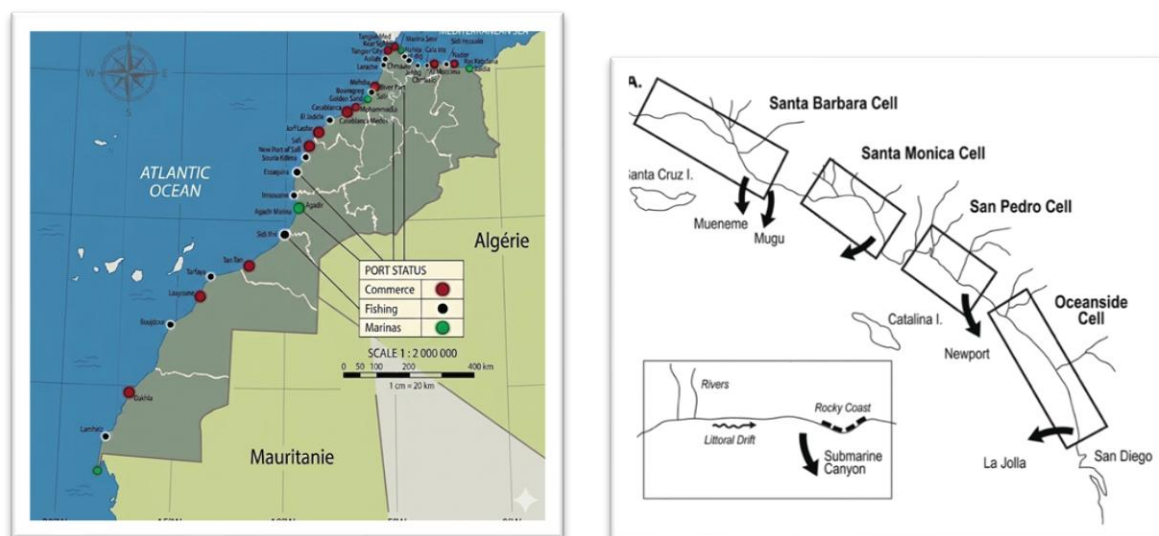


Figure 1. Location of Moroccan ports (left panel); example of coastal cell concept based on Komar (1976) (right panel)

In 1966, Bowen and Inman significantly advanced this model by introducing the technical parameters of accretion and erosion to quantify sediment inputs and outputs (Fig. 1). This shift facilitated the first formal attempt to calculate a sediment budget (Komar, 1976). Following decades of refinement by researchers such as Davies (1974), Carter (1988), Eliot (2016), and Van Rijn (2010), the coastal cell has become the primary analytical framework for interpreting the spatial and temporal evolution of coastlines. It allows researchers to move beyond simple observation and into precise modeling of sediment flux.

This study applies the coastal cell framework to a part of the Moroccan Atlantic coast; by delineating the specific sedimentary cells within this region, we aim to propose sustainable management strategies by integrating these natural sedimentary units into long-term coastal planning and protection efforts

2. HYDRODYNAMIC AND GEOMORPHOLOGICAL CHARACTERISTICS OF THE MOROCCAN ATLANTIC COAST

Morocco's Atlantic coast is exposed to open-ocean swell, resulting in high-energy NW wave action, particularly during winter storms. Persistent winds in some regions play a major role in driving longshore currents and shaping coastal sand dunes (Elmimouni, 2009). This coast also features a semi-diurnal tidal cycle. The tidal range is generally mesotidal, causing parts of the coastal zone to be periodically submerged and exposed.

The currents are represented by the constant cold Canary Current (with temperatures rarely exceeding 18°C), generated by the movement of the Azores High. This current flows at depths between 200 m and 300 m off the coast of Morocco at a speed of 25 cm/s to 75 cm/s, but it can sometimes reach 100 cm/s (Erimesco, 1969). This coast is also exposed to the occurrence of upwelling phenomena for the north to the south of Morocco.

From a geomorphological perspective, the Moroccan Atlantic coast can be divided into two large distinct geomorphological segments, heavily shaped by powerful ocean swells (Fig. 3):

- From Tangier to Sidi Ifni (includes Northern Plains, the Central Meseta and occidental Atlas): in the north section it is characterized by a low-lying, sedimentary coast featuring long, continuous sandy beaches and estuaries, like the Loukous, Sebou or Bouregreg (Elmimouni, et al, 2015); that are openly connected to the ocean. The south part of this district consists of a complex zone defined by high cliffs, the protected Oualidia Lagoon and extensive rocky headlands where the Atlas Mountains meet the sea to create long, sheltered bays and protected beaches.



Figure 3. Watersheds in Morocco

- From Sidi Ifni to Lagouira (The Saharan Coast): this part is characterized by the meeting of the desert and the ocean and characterized by straight vertical cliffs (between 30 and 50 meters high) cut sharply into desert plateaus.

The Atlantic Coastal drift current displaces large quantities of sediment and plays a very important role in the medium- and long-term coastal sediment budget (Stive and De Vriend, 1995), as it can both supply sediment to the coastal cell and remove it from it. Maximum longitudinal transport occurs in the surf zone, where sediments are resuspended and transported by the longshore current. The sediment entrained in the littoral drift in the Atlantic Coast of Morocco arrives through three main pathways:

- Watershed inputs (Continental Source): extensive watershed like the Loukouss, Sebou, Oum Er-Rbia, Tensift, and Souss naturally flush millions of tons of sand and clay down to the ocean during rainy winter floods.
- Cliff Erosion: provides a local source of sediments from the eroding aeolianite cliffs.
- Bioclastic Source: in many areas, like Essaouira and further south, beach sand contains a very high percentage of crushed marine shells and organisms (bioclastic sediment), giving the sand a distinct golden color and texture.

3. CONCLUSION AND DISCUSSION

Despite advanced legislative frameworks like Morocco's Coastal Law 81-12 (Article 3 mandates the protection of natural sediment systems), a profound gap persists between coastal preservation laws and geomorphological reality on the ground. The governance of the Moroccan Atlantic Coast suffers from a fundamental structural fragmentation. This disconnect is primarily driven by a striking mismatch between nature's boundaries, the natural sediment cells that dictate how sand actually moves along the coast, and the arbitrary administrative borders drawn between communes and provinces. This geographic misalignment is further complicated by an overcrowded landscape of institutional actors. A diverse array of ministries, hydraulic basin agencies, local authorities and port managers operate in isolation along the shoreline, frequently resulting in contradictory interventions.

Ultimately, this piecemeal approach persists because the region lacks integrated coordination tools and structures. It stands in sharp contrast to established international benchmarks, such as the Netherlands' holistic management by large hydrographic districts or the United Kingdom's Shoreline Management Plans, which are built entirely around natural sediment cells.

To effectively safeguard Moroccan littoral margins, it must shift from a reactive posture to a proactive, system-based understanding of sediment coastal cell dynamics. This requires a deeper, more targeted investigation into how complex coastal systems adapt to the multi-scale, cascading impacts of global change. academic research must treat coastal area as a living entity, integrating rigorous evaluations of past territorial planning with advanced predictive modeling. These models must be capable of anticipating not just ecological shifts, but the exact footprint, scale, and socioeconomic drivers of future coastal urbanization taking into account the concept of Coastal cells.

References

- Carter, B. (1988) Coastal environments: an introduction to the physical, ecological, and cultural systems of coastlines, Academic Press, New York.
- Davies JL. (1974). The coastal sediment compartment. Australian Geographical Studies. 12: 139-151.
- Elmimouni, A. (2009). Approche expérimentale de suivi de la dynamique morphosédimentaire du littoral d'Essaouira, Maroc : Implication pour un aménagement raisonné. Thèse de Doctorat, Université du Littoral, Côte d'Opale, Dunkerque, France, 259 p.
- Elmimouni, A. (2015). The role of the Wadi flood in the spatio-temporal sedimentary morphodynamics evolution in an arid/semi-arid beach: Wadi Ksob and Essaouira beach (Morocco) – Coastal and Maritime Mediterranean Conference, 3rd EDITION, FERRARA, ITALIA (2015).
- Eliot, M. (2016). Coastal sediments, beaches and other soft shores. CoastAdapt Information Manual 8, National Climate Change Adaptation Research Facility, Gold Coast.
- Erimesco, P. (1969). Observations sur l'hydrologie du plateau continental Atlantique du Maroc. (2ème note). Bulle. ESPM. Maroc, 17: 3-10.
- Inman, D. L., and T. K. Chamberlain. 1960. Littoral Sand Budget along the Southern California Coast. Report of the Twenty-first International Geological Congress, Copenhagen, Vol. of Abstracts, 245–246.
- Komar, P.D., (1976). Beach processes and sedimentation. New-Jersey, 429 pp.
- Rapport du ministère de l'équipement et de l'eau, (2023). Activités des ports au Maroc. Direction des ports et du domaine public maritime. 22 P.
- Stive, M.J.F. & de Vriend, H.J., (1995). Modeling shoreface profile evolution. Marine Geology 126 (1-4), pp. 235-248.
- van Rijn, LC. (2010). Coastal erosion control based on the concept of sediment cells. Prepared for the European Commission, Concepts and Science for Coastal Erosion Management, Conscience.

Capítulo III - Métodos e técnicas na geomorfologia

Mapa geomorfológico del sector de Penubina la Pequena (macizo de Peña Ubiña, Cordillera Cantábrica)

Geomorphological map of the Peña Ubiña la Pequeña sector (Peña Ubiña massif, Cantabrian Mountains)

D. Cañedo¹*

¹ Universidad de Oviedo, Departamento de Geografía, C/ Francisco de Miranda, s/n, 33003, Oviedo/Uviéu, Asturias, España.

* gallinardavid@uniovi.es

RESUMEN

Se presenta un sector representativo del mapa geomorfológico del macizo de Peña Ubiña elaborado a escala 1:10 000 así como el método de trabajo empleado en su confección. Se observan numerosas formas de modelado entre las que destacan las glaciares, periglaciares, kársticas y fluviotorrenciales, así como las estructuras y otras morfologías menos comunes. Esta cartografía es fundamental para la correcta ordenación del territorio de un espacio natural protegido como el Parque Natural de Las Ubiñas-La Mesa y el Parque Natural de Babia y Luna, que integran ambas vertientes del área de estudio.

Palabras clave: *Ubiña, Cordillera Cantábrica, mapa geomorfológico, formas de modelado, estructuras, Parque Natural.*

Keywords: *Ubiña, Cantabrian Mountains, geomorphological map, landforms, structures, Natural Park.*

1. INTRODUCCIÓN

La cartografía geomorfológica en la Cordillera Cantábrica es históricamente fragmentada y reciente. El hito fundacional fue el mapa de Llopis Lladó & Jordá Cerdá (1957), pionero, pero limitado por su escala. Posteriormente, el IGME aportó datos en sus series 1:50.000, aunque con escaso detalle en morfologías complejas. Pese a intentos institucionales, como el programa del Gobierno del Principado de Asturias (2001-2004), la producción ha dependido mayoritariamente de tesis doctorales y estudios específicos. Entre las obras de síntesis destacan las de Castañón (1996) y Martín Serrano (2005). En la década de 1980, surgieron esquemas en blanco y negro de autores como Frochoso (1980), Muñoz Jiménez (1980), Castañón & Frochoso (1986), Alonso Herrero (1987), Sáez Hernández & Gómez Benito (1988) y Flor & Baylon-Misioné (1989). En el siglo XXI, el uso de SIG, el color y el empleo de escalas mayores, como la 1:25.000 elevaron la calidad. Destacan en esta etapa autores como González Trueba (2006), Santos González (2010), Ruiz Fernández (2011), Pellitero (2014), Rodríguez Pérez (2015) y González Gutiérrez *et al.* (2017).

Específicamente para el macizo de Peña Ubiña, existen aportaciones previas, siendo el primer intento el trabajo de Marcos *et al.* (1980) como parte del MAGNA. Posteriormente, Castañón (1983, 1984, 1989) realizó los primeros mapas de detalle, enfocados principalmente al glaciario y al modelado de aludes de nieve. Los esfuerzos más recientes los concretó Alonso (2014, 2019), quien caracterizó las formas de modelado del área de estudio a escala 1:22.000.

A pesar de los avances geomorfológicos existentes y de la elaboración de una cartografía cada vez más abundante y detallada, se observa la necesidad de elaborar mapas de precisión, completos y pormenorizados, especialmente en sectores de relevancia geomorfológica. Así pues, el objetivo de

este trabajo es presentar una parte del mapa geomorfológico macizo de Peña Ubiña, en el cual se hace un inventario exhaustivo todos los procesos y formas presentes en el área de estudio a escala 1:10.000.

2. MÉTODO

El método utilizado en la confección de la cartografía geomorfológica es el RCP 77 del CNRS (Joly, 1997), si bien se han incorporado adaptaciones realizadas sobre este método (Ruiz Fernández, 2011). El programa utilizado para la salida final de la cartografía ha sido CorelDraw en su versión Graphics Suite 2021. Asimismo, se ha optado por emplear la escala 1:10 000, la cual permite incluir detalle.

Para la realización de la cartografía geomorfológica se han utilizado como base los resultados anotados en las minutas dibujadas durante el trabajo de campo, el cual se completó mediante fotointerpretación efectuada a partir de visión estereoscópica. Para ambas tareas se usaron fotografías aéreas del PNOA a escala 1:15 000. Por su parte, la base utilizada en la confección digital del mapa fue el ortofotomapa (PNOA) del total del área del macizo de Peña Ubiña, sobre la que se superpuso la topografía en formato vectorial creada a partir de las hojas del MTN a escala 1:25 000 de «Bárzana», «Torrebarrio» y «Sena de Luna» (N.º 77-II, 77-IV y 102-II, respectivamente). La información geomorfológica aportada en la cartografía está dividida en conjuntos de colores, los cuales se agrupan en: roquedo, formas estructurales, formas glaciares, formas periglaciares, formas nivales, formas gravitacionales, formas kársticas, formas fluviales y torrenciales, agua, formas antrópicas y topografía.

La capa base de la cartografía geomorfológica realizada en este trabajo es el roquedo, en el cual se han distinguido calizas y otros materiales. Esto se justifica por la importancia que tienen las rocas calcáreas en la configuración del relieve y las geoformas del macizo de Peña Ubiña, mientras que el resto del sustrato (mayormente pizarroso, arenoso y cuarcítico), es menos representativo y tiende a presentar otro tipo de morfologías. Así pues, se han utilizado dos colores, el gris claro para las calizas y el marrón claro o arena para el resto de los materiales. Por su parte, las formas estructurales y tectónicas se representan como líneas negras gruesas.

Las formas de abrasión y de acumulación glaciar se representan en tonos violetas, las formas y procesos periglaciares se dibujaron en color morado pascua, las morfologías gravitacionales se muestran en marrón, el modelado kárstico se simboliza con color turquesa, las formas de modelado fluvial, torrencial y los humedales se trazaron en verde, el agua se muestra en cian y las formas de origen antrópico en marrón oscuro. Asimismo, se han dibujado algunos elementos en colores diferenciados para destacarlos o distinguirlos, como los neveros, en celeste pálido. Además, en varias de las formas de modelado representadas se han empleado diferentes intensidades dentro del mismo tono, como las crestas de las morrenas en el *till*, las cuales se trazaron en un tono violeta más intenso.

3. RESULTADOS

El mapa geomorfológico del sector de Penubina la Pequena (macizo de Peña Ubiña) (Figura 1) es un fragmento de 2 kilómetros (este-oeste) por 1 kilómetro (norte-sur) del mapa original (12 por 10,5 kilómetros) en el que están representados 24 símbolos (63 el original) entre los que está la litología, las estructuras y las formas glaciares, periglaciares, kársticas, fluviotorrenciales, gravitacionales y las de origen antrópico, lo que supone una muestra significativa del área de estudio completa.

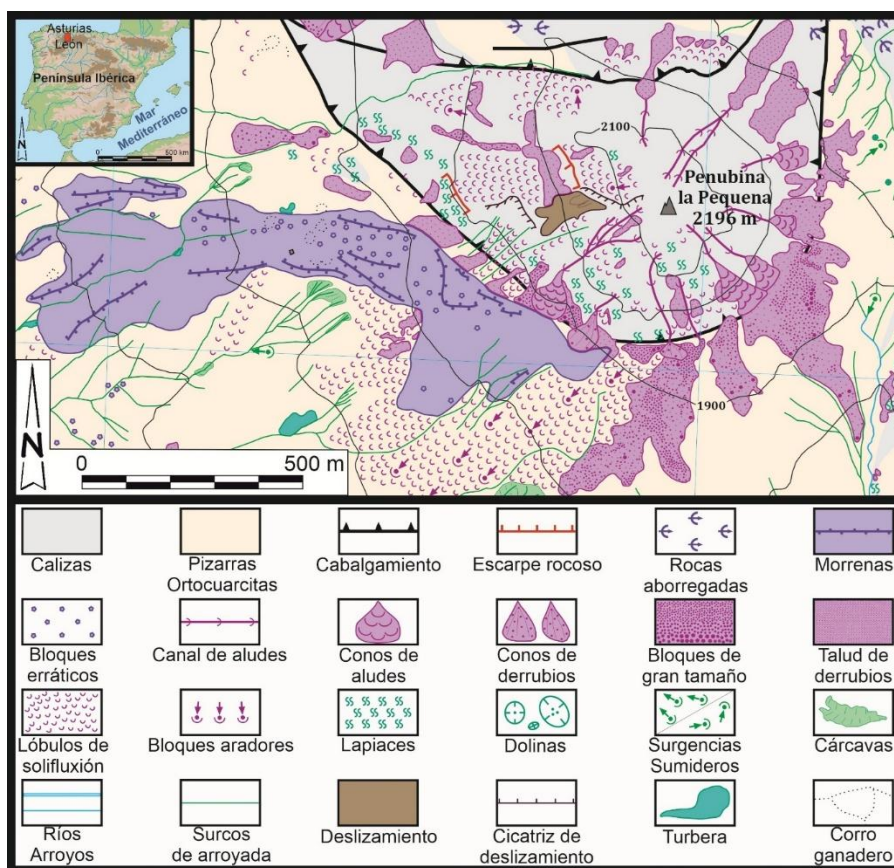


Figura 1. Mapa geomorfológico del sector de Penubina la Pequena (macizo de Peña Ubiña).

Entre las morfologías existentes cabe mencionar el importante papel que juega la litología, ya que determina la aparición de unas u otras formas de modelado, como los lapiaces en las calizas, mientras que la solifluxión y en especial los bloques aradores, muestran una preferencia clara por los sectores terrígenos y con suelos más profundos. Destaca también la abundancia de pedreras, claramente alimentadas por las calizas, mientras que hacia el oeste se observan las morrenas heredadas de un glaciar cubierto, con abundancia de bloques de gran tamaño y algunas crestas que marcan pulsaciones.

4. CONCLUSIONES

El mapa geomorfológico del macizo de Peña Ubiña, del que se presenta una muestra en este trabajo, supone un elemento fundamental en cualquier plan de ordenación de los recursos naturales de un espacio natural protegido, como los Parques Naturales y Reservas de la Biosfera de Las Ubiñas-La Mesa y Babia y Luna, a los que pertenecen las vertientes asturiana y leonesa del área de estudio. Además, funcionará como la base para realizar futuros trabajos geomorfológicos técnicos al catalogar y ubicar todas formas de modelado y las estructuras existentes. De esta forma, se muestra una herramienta que será válida tanto para el uso académico como para el desarrollo local y su correcta ordenación.

Referencias

- Alonso, V. (2014). Mapa geomorfológico del sector sur del Macizo de las Ubiñas (Cordillera Cantábrica, NO de España). *Trabajos de Geología*, 34, 125-132. <https://doi.org/10.17811/tdg.34.2014.125-132>
- Alonso, V. (2019). Geomorphology of the Ubiñas Massif, Cantabrian Mountains, NW Spain (1:22,000). *Journal of Maps*, 15(2), 238-246. <https://doi.org/10.1080/17445647.2019.1579763>

- Alonso Herrero, E. (1987). Huellas del glaciario cuaternario en las cabeceras del río Esla, vertiente sur de la Cordillera Cantábrica (León). *Cuaternario y Geomorfología*, 1, 49-59.
- Castañón, J. C. (1983). El glaciario cuaternario del Macizo de Ubiña (Asturias-León) y su importancia morfológica. *Ería*, 4, 3-49. <https://doi.org/10.17811/er.0.1983.3-49>
- Castañón, J. C. (1984). Sobre el modelado originado por los aludes de nieve en el Prau del Albo (Alto Huerna, Asturias). *Ería*, 6, 106-112. <http://dx.doi.org/10.17811/er.0.1984.106-112>
- Castañón, J. C. (1989). Las formas de relieve de origen glaciar en los sectores central y oriental del Macizo Asturiano [Tesis doctoral, Universidad de Oviedo].
- Castañón, J. C. (1996). Mapa Geomorfológico de Asturias. En VV. AA. (Ed.), *Gran Atlas del Principado de Asturias* (Tomo I, pp. 78-80). Ediciones Nobel.
- Castañón, J. C. & Frochoso, M. (1986). Morfología glaciar comparada en las Montañas Cantábricas (Sierra de Peña Sagra y Macizo Oriental de los Picos de Europa). *Ería*, 10, 87-107. <https://doi.org/10.17811/er.0.1986.87-107>
- Flor, G. & Baylon-Misioné, J. I. (1989). El glaciario cuaternario de los Puertos de Áliva (Macizo Oriental de los Picos de Europa, Occidente de Cantabria). *Cuaternario y Geomorfología*, 3(1-2), 27-34.
- Frochoso, M. (1980). El Macizo Central de los Picos de Europa y sus glaciares. *Ería*, 1, 67-87.
- González Gutiérrez, R. B., Santos González, J., Gómez Villar, A., Redondo Vega, J. M. & Prieto Sarro, I. (2017). Geomorphology of the Curueño River headwaters, Cantabrian Mountains (NW Spain). *Journal of Maps*, 13(2), 382-394. <https://doi.org/10.1080/17445647.2017.1316217>
- González Trueba, J. J. (2006). El Macizo Central de los Picos de Europa: geomorfología y sus implicaciones geocológicas en la alta montaña cantábrica [Tesis doctoral, Universidad de Cantabria].
- Joly, F. (1997). *Glossaire de géomorphologie. Base de données sémiologiques pour la cartographie*. Armand Colin.
- Llopis Lladó, N. & Jordá Cerdá, F. (1957). Mapa del cuaternario de Asturias [Mapa]. Escala 1:250.000. Diputación provincial de Oviedo.
- Marcos, A., Pérez Estaún, A., Pulgar, J. A., Bastida, F., Aller, J., García Alcalde, J. L., Sánchez de Posada, L. & Rodríguez Fernández, L. R. (1980). Mapa Geológico de España (1:50.000), hoja 77 (La Plaza, Teverga) [Mapa]. Instituto Geológico y Minero de España (IGME).
- Martín Serrano, Á. (2005). Mapa geomorfológico de España y del margen continental a escala 1:1.000.000. Instituto Geológico y Minero de España (IGME).
- Muñoz Jiménez, J. (1980). Morfología estructural y glaciario en la Cordillera Cantábrica: el relieve del Sinclinal de Saliencia (Asturias-León). *Ería*, 1, 35-65. <http://dx.doi.org/10.17811/er.0.1980.35-65>
- Pellitero, R. (2014). Geomorphology and geomorphological landscapes of Fuentes Carrionas. *Journal of Maps*, 10(2), 313-323. <https://doi.org/10.1080/17445647.2013.867822>
- Ruiz Fernández, J. (2011). Geomorphological map of an Atlantic mid-height mountain area: the Juan Robre and Jana Ridge (Cantabrian Range, Northwest Spain). *Journal of Maps*, 7(1), 260-272. <https://doi.org/10.4113/jom.2011.1173>
- Sáez Hernández, J. M. y Gómez de Benito, L. (1988). Evolución morfológica del Monte Suevo. *Ería*, 15, 80-84. <https://doi.org/10.17811/er.0.1988.80-84>
- Santos González, J. (2010). Glaciario y periglaciario en el alto Sil, provincia de León (Cordillera Cantábrica) [Tesis doctoral, Universidad de León].

Deteção de processos erosivos lineares: eficácia do algoritmo Topographic Negative Openness em levantamentos LIDAR

Detection of linear erosion processes: efficacy of the Topographic Negative Openness algorithm in LiDAR-based surveys

S. L. Teixeira^{1 *}, S. Pereira^{2,3}

¹Faculdade de Letras da Universidade do Porto; Via Panorâmica, s/n, 4150-564 Porto; steixeira@letras.up.pt

²Centro de Estudos em Geografia e Ordenamento do Território, Faculdade de Letras da Universidade do Porto; Via Panorâmica, s/n, 4150-564 Porto; sspereira@letras.up.pt

³Centro de Estudos Geográficos, IGOT, Universidade de Lisboa; Rua Branca Edmée Marques, edifício IGOT. 1600-276, Lisboa

RESUMO

Neste trabalho, avalia-se a eficácia da aplicação do algoritmo do índice Topographic Negative Openness (TNO) na identificação de processos erosivos lineares, com base em dois levantamentos altimétricos de LiDAR (2014-2024). A área de estudo localiza-se na Andaluzia, com cultivo de olival permanente apresentado um ambiente agrícola dinâmico, onde o método superou o mascaramento da lavoura, com AUC até 0,79 e Taxa de Verdadeiros Positivos de 0,87. Conclui-se que o TNO demonstrou aptidão para garantir a estabilidade dos *thresholds* e para detetar precocemente sulcagens efémeras não identificadas nos inventários visuais. Verifica-se ainda que a precisão real obtida supera a estimativa estatística prevista, validando o TNO como uma ferramenta preditiva eficaz, mesmo perante o ruído associado à atividade antrópica.

Palavras-chave: *Erosão hídrica, Ravinas, Topographic Negative Openness, LiDAR*

Keywords: *Water erosion, Gully, Topographic Negative Openness, LiDAR*

1. INTRODUÇÃO

A crescente pressão sobre os recursos naturais e a necessidade de uma gestão sustentável do território têm impulsionado a adoção de ferramentas de análise espacial cada vez mais sofisticadas (Wang *et al.*, 2023). A identificação de áreas suscetíveis à concentração do escoamento superficial e à formação de ravinas é particularmente relevante em sistemas de agricultura permanente, como os olivais da Andaluzia, onde as taxas de erosão podem atingir 10 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ (Espejo-Pérez *et al.*, 2013).

Embora as técnicas de deteção remota tenham-se difundido nas últimas décadas e sejam amplamente utilizadas em contextos agrícolas, nomeadamente na monitorização da mobilização do solo, práticas de conservação, processos erosivos associados à agricultura e elementos do relevo natural ou artificial, que afetam o escoamento superficial (Wang *et al.*, 2023; Lima *et al.*, 2021), a sua aplicação à avaliação de fenómenos de erosão hídrica em áreas agrícolas apresenta limitações relevantes. Estas estão sobretudo associadas à dificuldade de explorar plenamente o potencial tecnológico destas técnicas e à complexidade inerente à variabilidade espacial dos processos erosivos locais (Lima *et al.*, 2021). Isto é especialmente evidente na identificação de ravinas em fases iniciais de formação, cujas dimensões reduzidas e a elevada variabilidade espacial tornam difícil a sua deteção direta. Além disso, a cobertura

vegetal e a alteração contínua da superfície do solo podem mascarar a expressão destas feições, limitando a eficácia das abordagens convencionais.

O *Topographic Negative Openness* (TNO) quantifica a concavidade e o confinamento do terreno, permitindo a identificação de feições geomorfológicas como vales, ravinas e deslizamentos (Anders *et al.*, 2009). Estudos anteriores comprovaram que o TNO realça a morfologia, independentemente da direção da iluminação, por fornecer uma representação estável do micro-relevo, essencial para a delimitação de eixos de drenagem e cabeceiras (Lv *et al.*, 2025; Anders *et al.*, 2009), o que é essencial para compreender a dinâmica erosiva (Lv *et al.*, 2025). Além disso, diferentemente de métricas de curvatura ou de relevo sombreado tradicionais, que permitem detetar tanto ravinas permanentes altamente modificadas quanto feições incipientes ainda invisíveis a outros métodos (Ezeh *et al.*, 2021). Neste contexto, torna-se objetivo deste estudo avaliar, perante a complexidade inerente a um sistema agrícola, a eficiência do TNO para identificar áreas de ravinas e as suas variações ao longo do tempo, considerando precisões centimétricas.

2.METODOLOGIA

O índice TNO foi calculado no SAGA GIS, utilizando o algoritmo padrão e a vizinhança circular predefinida, tendo sido necessário proceder anteriormente ao tratamento dos dados altimétricos (Fig. 1). O cálculo do índice avalia a média do ângulo zenital em múltiplas direções dentro de um raio de pesquisa definido, permitindo identificar áreas onde o horizonte é bloqueado ou aberto pelo relevo circundante (Yokoyama *et al.*, 2002). Valores mais elevados de TNO correspondem a maior incidência de incisão topográfica e confinamento, características típicas das ravinas (Anders *et al.*, 2009; Yokoyama *et al.*, 2002).

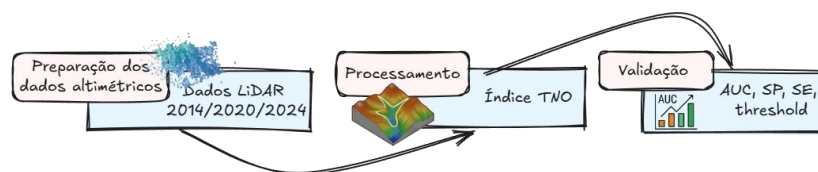


Figura 1. Fluxograma de metodologia aplicada

Para avaliar a consistência temporal e a capacidade de deteção do TNO (Fig.1), foram comparados os resultados obtidos para cada ano com os o inventário histórico de ravinas previamente mapeadas correspondentes aos anos de 2011, 2013, 2016, 2019 e 2022, tendo por base a foto-interpretação de ortofotomapas com 50 cm de resolução (Instituto Geográfico Nacional-IGN). A validação da performance do índice foi realizada por meio de scripts em R, utilizando métricas ROC, incluindo a Área Abaixo da Curva (AUC), Taxa de Verdadeiros Positivos (TVP), Taxa de Falsos Negativos (TFN) e limiar ótimo (Conoscenti e Rotigliano, 2020).

Os Modelos Digitais de Elevação foram gerados a partir de dados altimétricos de *LiDAR* (IGN) para 2014, 2020 e 2024, com uma densidade de pontos variando entre 0,5 e 1,5 pontos/m². Durante o processamento do LiDAR as nuvens de pontos “originais” passaram por um processo de reclassificação automática, utilizando a ferramenta *Classify LAS Ground do ArcGIS Pro*, removendo ruído, vegetação e estruturas antropogénicas mal classificadas. Após a extração dos pontos de solo, as nuvens foram convertidas em MDTs com resolução espacial de 0,75 m, adequada à densidade de pontos disponível. Todos os MDTs foram posteriormente corrigidos com a ferramenta *Fill do ArcGIS Pro*, eliminando imperfeições que poderiam comprometer a análise da dinâmica erosiva.

3.RESULTADOS

A análise espacial do índice TNO (Fig. 2) revela uma assinatura geomorfológica clara, permitindo identificar uma elevada consistência na localização das ravinas. Nas Zonas A, B e C, o índice TNO (vermelho) delimita com precisão o limite das feições erosivas. Entre 2014 e 2024, observa-se que, embora a mancha de incisão sofra alterações no contorno devido a intervenções agrícolas, o "núcleo" da ravina permanece detetável, o que comprova que o índice funciona, mesmo com alterações superficiais temporárias.

Um dos pontos de maior valor desta análise é a capacidade do TNO de mapear as áreas de transição (tons amarelos e verde-claro). Estas áreas, que circundam as ravinas principais, correspondem, em grande parte dos casos, a processos de sulcagem e de ravinamento efêmero.

Além disso, valores extremos de TNO relacionam-se com elementos antropogénicos, especialmente caminhos agrícolas e proximidade a estradas (Figura 2). Estas estruturas funcionam como eixos de concentração do escoamento superficial, evidenciando como a rede de drenagem se ajusta a essas barreiras. Similarmente, a rede de drenagem é muito realçada no extremo norte da área de contribuição.

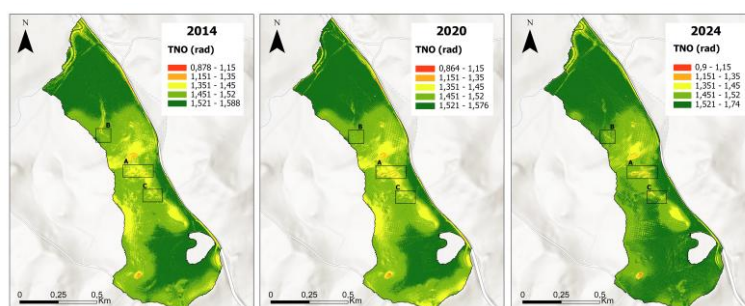


Figura 2. *Topographic Negative Openness* (2014, 2020, and 2024).

Os resultados da validação independente revelam uma boa performance estatística (Quadro 1), com valores de AUC (Área Abaixo da Curva) entre 0,67 (em 2020) e 0,79 (em 2024), o que indica uma boa capacidade de discriminar entre áreas estáveis e áreas com incisão erosiva. Observa-se que, embora os limiares ótimos tenham permanecido relativamente constantes, em torno de 1,48 a 1,52 rad, a metodologia apresentou uma TVP superior ao aleatório, e particularmente elevada em 2020 (0,87), demonstrando grande sensibilidade na deteção das feições. Contudo, a variação na TFP, sempre inferior à aleatoriedade, sugere que a complexidade topográfica ainda pode gerar excesso de ruído, sendo a análise multiescala e o pré-processamento rigoroso dos MDTs passos cruciais para refinar a precisão.

Quadro 1. Métrica ROC do "negative topographic openness" utilizando o inventário histórico.

	LIMIAR ÓTIMO	AAC	TVP	TFP
2024	1.48	0.79	0.64	0.32
2020	1.50	0.67	0.87	0.38
2014	1.52	0.73	0.81	0.50

4.DISCUSSÃO

A performance do índice TNO revela-se surpreendentemente robusta, especialmente considerando que a área de estudo localiza-se numa área agrícola em constante evolução, onde a atividade antrópica

recorrente tende a mascarar feições erosivas. Mesmo neste cenário dinâmico, o modelo superou significativamente a classificação aleatória, apresentando Taxas de Verdadeiros Positivos elevadas e uma notável consistência no limiar ótimo ao longo da série temporal. Esta estabilidade do limiar é um indicador-chave da resiliência da metodologia diante das variações no detalhe do MDT e das alterações anuais na superfície do solo.

Contudo, a interpretação da precisão quantitativa deve ser cautelosa: o grupo de validação, embora rigoroso, apresenta limitações inerentes. O inventário foca-se em ravinas permanentes, enquanto o TNO demonstra uma capacidade muito boa de deteção real, identificando processos mais finos de incisão, como ravinas efêmeras e sulcagem nas zonas envolventes (Zonas A, B e C), que não estão representadas na validação. Além disso, a presença de vegetação rasteira e intervenções, como a plantação de árvores no interior das ravinas, criam irregularidades e colmatações que "ruído" estatístico. Portanto, é muito provável que a capacidade real de acerto do modelo seja superior à precisão quantificável, uma vez que muitos dos "falsos positivos" estatísticos correspondem, na verdade, a processos erosivos reais em fase inicial ou a áreas de intensa influência antrópica (e.g. proximidade a estradas).

Além disso, a performance desta técnica nos três períodos em análise (2014, 2020 e 2024) apresentou resultados consistentes. O TNO de 2024 atingiu o maior valor de AAC (0,79), apresentando uma menor dispersão de ruído nas encostas e uma maior estabilidade do limiar, permitindo uma separação mais detalhada da rede de drenagem superficial.

5. CONCLUSÕES

O índice *Negative Topographic Openness* provou-se uma ferramenta eficaz na identificação semiautomática de áreas de ravinas, demonstrando desempenho extremamente robusto em modelos digitais de terreno de alta resolução. Além disso, é uma ferramenta para comparar a evolução destas formas de relevo ao longo do tempo e o seu impacto na morfologia geral. Visualmente, os mapas confirmam que o TNO não é apenas um classificador estatístico, mas um indicador geomorfológico de processos, antecipando o inventário ao detetar a sulcagem e resistindo ao 'mascaramento' provocado pelas práticas agrícolas, reafirmando a probabilidade de existência de ravinas mesmo onde houve tentativa de recuperação do terreno.

Ao integrar esta ferramenta num sistema de apoio à decisão, é possível melhorar a gestão do solo, orientar intervenções preventivas e promover práticas agrícolas mais sustentáveis, superando as limitações das técnicas de deteção remota convencionais.

Agradecimentos

Este trabalho foi financiado pelo projeto LivingSoiLL "Healthy Soil to Permanent Crops Living Labs", Horizonte Europa financiado pela Comissão Europeia ao abrigo do Grant Agreement 101157502 no âmbito da Missão da UE "A Soil Deal for Europe".

Este trabalho foi financiado por fundos nacionais através da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P., no âmbito do projeto UID/04084 – Centro de Estudos de Geografia e Ordenamento do Território.

Referências

Anders, N. S., Seijmonsbergen, A. C., & Bouten, W. (2009). Multi-scale and object-oriented image analysis of high-resolution LiDAR data for geomorphological mapping in Alpine mountains. In Proceedings of Geomorphometry. Zurich, Switzerland.

- Conoscenti, C., & Rotigliano, E. (2020). Predicting gully occurrence at watershed scale: Comparing topographic indices and multivariate statistical models. *Geomorphology*, 359, 107123. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107123>
- Espejo-Pérez, A. J., Rodríguez-Lizana, A., Ordóñez, R., & Giráldez, J. V. (2013). Soil loss and runoff reduction in olive-tree dry-farming with cover crops. *Soil Science Society of America Journal*, 77(6), 2140–2148. <https://doi.org/10.2136/sssaj2013.06.0250>
- Ezeh, C. U., Preko, K., Igwe, O., Adjei, K., Schönbrodt-Stitt, S., & Asare, M. Y. (2021). Assessment of gully erosion: A review. *Journal of African Earth Sciences*, 180, 251–275.
- Lima, F., Blanco-Sepúlveda, R., Gómez-Moreno, M. L., Dorado, J., & Peña, J. M. (2021). Mapping tillage direction and contour farming by object-based analysis of UAV images. *Computers and Electronics in Agriculture*, 187, 106281. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106281>
- Lv, J., Lu, C., Ye, M., Long, Y., Li, W., & Yang, M. (2025). Enhanced landslide visualization and trace identification using LiDAR-derived DEM. *Sensors*, 25. <https://doi.org/10.3390/s25144391>
- Wang, J., Zhen, J., Hu, W., Chen, S., Lizaga, I., Zeraatpisheh, M., & Yang, X. (2023). Remote sensing of soil degradation: Progress and perspective. *International Soil and Water Conservation Research*, 11, 429–454. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2023.03.002>
- Yokoyama, R., Shirasawa, M., & Pike, R. J. (2002). Visualizing topography by openness: A new application of image processing to digital elevation models. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 68(3), 257–265.

FozWaSe: adaptação de uma abordagem de monitorização integrada da qualidade de água e sedimentos no braço norte do estuário do Mondego

FozWaSe: adaptation of an integrated water and sediment quality monitoring approach to the northern branch of the Mondego Estuary

J. L. Rocha^{1*}, M. Gouveia^{1,2*}, A. P. Fernandes¹, J. A. Marques-Silva¹

¹Município da Figueira da Foz, CI.CMAC

²MARE – Centro de Ciências do Mar e do Ambiente

CI.CMAC@cm-figfoz.pt

RESUMO

O projeto FozWaSe, desenvolvido no âmbito do *DALIA – Danube Region Water Lighthouse Action*, adapta ao braço norte do estuário do Mondego a abordagem integrada do DPS7, originalmente concebida para o Delta do Danúbio. A avaliação inicial evidenciou um gradiente flúvio-estuarino-marinho e o forte controlo morfodinâmico da maré e da intrusão salina, reforçando a relevância da monitorização contínua para a compreensão dos processos sedimentares e para a gestão estuarina adaptativa.

Palavras-chave: *Estuário do rio Mondego, monitorização contínua, qualidade de água, sedimentos, gestão estuarina, FozWaSe.*

Keywords: *Mondego River estuary, continuous monitoring, water quality, sediments, estuarine management, FozWaSe.*

1. INTRODUÇÃO

Os estuários são sistemas costeiros de transição, marcados pela interação entre processos fluviais, estuarinos e marinhos, o que lhes confere elevada complexidade geomorfológica, hidrodinâmica e sedimentar. No estuário do Mondego, esta complexidade resulta da conjugação entre o regime de maré, a variabilidade do caudal fluvial, a intrusão salina e a configuração morfológica do sistema, fatores que condicionam a renovação da água, os tempos de residência e a organização dos processos sedimentares (Duarte et al., 2001; Cunha & Dinis, 2002; Mendes et al., 2021).

O braço norte do estuário do Mondego, mais profundo e hidrodinamicamente mais ativo, constitui um setor particularmente sensível à interação entre forçamento de maré, influência marinha, dinâmica fluvial e pressões antrópicas associadas ao porto e às dragagens regulares. A literatura sobre o Mondego tem evidenciado a importância da sua variabilidade físico-química e ecológica, bem como a necessidade de abordagens integradas de monitorização em sistemas de transição desta natureza (Costa et al., 2013; Mendes et al., 2021).

Neste contexto, o projeto FozWaSe desenvolve-se no âmbito do projeto-mãe *DALIA – Danube Region Water Lighthouse Action*, enquadrado na *EU Mission “Restore our Ocean and Waters”*. O FozWaSe constitui uma adaptação, em contexto estuarino costeiro, da abordagem metodológica desenvolvida

no DPS7, originalmente concebida para o ramo de Sulina, no Delta do Danúbio, com forte componente de monitorização contínua, integração entre água e sedimentos e suporte à decisão. Mais do que uma replicação estrita, trata-se de uma replicação adaptada a um sistema geomorfologicamente distinto, preservando a lógica tecnológica e metodológica da solução original.

2. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo apresentar o projeto FozWaSe como adaptação, ao braço norte do estuário do Mondego, da abordagem integrada desenvolvida no DPS7 no âmbito do projeto *DALIA – Danube Region Water Lighthouse Action*, evidenciando o potencial desta solução para a monitorização da qualidade da água e dos sedimentos em contexto estuarino costeiro.

3. METODOLOGIA

A metodologia adotada no projeto FozWaSe baseia-se na transferência e adaptação da abordagem desenvolvida no DPS7 a um sistema estuarino costeiro com características geomorfológicas e morfodinâmicas distintas. A solução implementada integra uma estação automática de monitorização contínua e campanhas periódicas de análise de água e sedimentos em pontos estratégicos do braço norte do estuário do Mondego, permitindo articular aquisição temporal de elevada resolução com caracterização espacial do sistema (Figura 1).



Figura 3. Localização da área de estudo no braço norte do estuário do Mondego, com a identificação da estação de monitorização contínua.

A componente contínua assenta numa estação instalada em setor portuário do braço norte, destinada à aquisição sistemática de nível da água, temperatura, salinidade e oxigénio dissolvido. Complementarmente, foram realizadas campanhas periódicas de amostragem de água e sedimentos em pontos representativos da entrada e saída do sistema, visando obter uma situação de referência da qualidade ambiental do setor monitorizado e apoiar a interpretação da sua variabilidade espacial e temporal.

A abordagem metodológica adotada preserva a lógica integrada do DPS7, mas adapta-a a um contexto estuarino fortemente condicionado pela maré, pela intrusão salina e pela interação entre processos fluviais e marinhos. Deste modo, a monitorização contínua permite acompanhar a resposta do sistema

às oscilações hidrodinâmicas, enquanto as campanhas periódicas complementam essa informação com análises físico-químicas da água e dos sedimentos (Quadro 1).

Quadro 1. Síntese dos parâmetros monitorizados no projeto FozWaSe.

Componente	Monitorização contínua	Campanhas periódicas
Água	Nível de água, temperatura, salinidade e condutividade, O ₂ dissolvido e turbidez	Parâmetros físico-químicos
Sedimentos	-	Nutrientes e metais pesados

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A avaliação inicial do braço norte do estuário do Mondego evidenciou um gradiente flúvio-estuarino-marinho bem definido, controlado pela interação entre descarga fluvial, propagação da maré e intrusão salina. Em condições de maior influência marinha, registaram-se valores de salinidade até 26 PSU e condutividade da ordem dos 44 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, com TDS ~ 20 ppt, enquanto na estação elevatória de Foja a salinidade variou entre 2,92 e 0,315 PSU, evidenciando a transição para condições oligohalinas a montante. Estes resultados confirmam a elevada variabilidade hidrodinâmica do sistema e o papel estruturante da cunha salina, em consonância com a dinâmica previamente descrita para o estuário do Mondego por Duarte et al. (2001), Cunha e Dinis (2002) e Mendes et al. (2021).

Do ponto de vista da qualidade físico-química da água, os resultados apontam globalmente para condições compatíveis com boa qualidade ambiental. O oxigénio dissolvido variou, em geral, entre 7 e 10 mg/L, com valores de saturação entre 90 e 120% em condições de maré alta e entre 72,6 e 127% em maré baixa. O pH apresentou valores tendencialmente neutros a alcalinos, oscilando aproximadamente entre 7,8 e 9,9, com os valores médios mais baixos a montante. A variabilidade observada entre condições de maré e momentos sazonais reforça a necessidade de um sistema capaz de acompanhar a resposta do estuário às oscilações hidrodinâmicas. Estes resultados estão de acordo com trabalhos anteriores que evidenciam a sensibilidade do Mondego à variabilidade hidrológica, aos tempos de residência e à influência da maré na organização físico-química do sistema (Duarte et al., 2001; Mendes et al., 2021).

Nos sedimentos, a campanha inicial não evidenciou contaminação significativa para os parâmetros analisados. Embora os valores obtidos para metais-traço tenham sido relativamente mais elevados no ponto mais próximo da foz do rio do que no ponto mais a montante, todos os metais avaliados — incluindo Pb, As, Cd, Cr, Ni e Zn — permaneceram dentro da Classe 1 da classificação portuguesa, compatível com “material limpo”. Estes resultados são coerentes com um setor de influência portuária e urbana, mas simultaneamente importantes enquanto situação de referência para o acompanhamento futuro do sistema. A relevância da integração de descritores físico-químicos e sedimentares na avaliação ecológica de sistemas de transição como o Mondego tem sido sublinhada por Teixeira et al. (2007, 2008).

Neste contexto, a principal mais-valia do FozWaSe reside na adaptação bem-sucedida de uma solução originalmente concebida para um ambiente deltaico a um sistema estuarino costeiro com características morfodinâmicas distintas. A integração entre campanhas periódicas e monitorização contínua permite produzir séries temporais de maior resolução, acompanhar a resposta do sistema à maré e à intrusão salina e reforçar o suporte à futura modelação e à gestão estuarina adaptativa. A

utilidade de abordagens deste tipo tem sido também demonstrada em trabalhos da equipa romena na região do baixo Danúbio e Delta do Danúbio, onde índices de qualidade da água e ferramentas analíticas foram usados para otimizar estratégias de monitorização (Calmuc et al., 2020).

5. CONCLUSÕES

O projeto FozWaSe demonstra a pertinência da adaptação da abordagem DPS7 ao braço norte do estuário do Mondego, num contexto geomorfológico e morfodinâmico distinto do Delta do Danúbio. A avaliação inicial confirmou a relevância da maré, da intrusão salina e do gradiente flúvio-estuarino-marinho na organização do sistema, bem como o interesse de integrar monitorização contínua e campanhas periódicas.

A solução implementada constitui uma base sólida para aprofundar o conhecimento sobre a dinâmica sedimentar e a variabilidade ambiental do braço norte, reforçando o potencial do sistema para apoiar a monitorização integrada da qualidade da água e dos sedimentos e a gestão estuarina adaptativa.

Agradecimentos

Trabalho desenvolvido no âmbito do projeto FozWaSe, financiado ao abrigo do projeto *DALIA – Danube Region Water Lighthouse Action*. The FozWaSe has indirectly received funding from European Union, via *DALIA Rivers Revived Open Call* issued and executed under the *DALIA project (grant Agreement no. 101094070-DALIA)*.

Referências

- Calmuc, M., Calmuc, V., Arseni, M., Topa, C., Timofti, M., Georgescu, L. P., & Iticescu, C. (2020). A comparative approach to a series of physico-chemical quality indices used in assessing water quality in the Lower Danube. *Water*, 12(11), 3239. <https://doi.org/10.3390/w12113239>.
- Costa, J. C., Lillebø, A. I., Sousa, A. I., Ferreira, J. G., Silva, T., & Pardal, M. A. (2013). The contribution of scientific research for integrated coastal management: The Mondego estuary as a study case. *Revista de Gestão Costeira Integrada / Journal of Integrated Coastal Zone Management*, 13(2), 263–275. <https://doi.org/10.5894/rgci391>.
- Cunha, P. P., & Dinis, J. L. (2002). Sedimentary dynamics of the Mondego estuary. In M. A. Pardal, J. C. Marques, & M. A. Graça (Eds.), *Aquatic ecology of the Mondego River basin: Global importance of local experience* (pp. 43–62). Imprensa da Universidade de Coimbra.
- Mendes, J., Ruela, R., Picado, A., Pinheiro, J. P., Ribeiro, A. S., Pereira, H., & Dias, J. M. (2021). Modeling dynamic processes of Mondego Estuary and Óbidos Lagoon using Delft3D. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(1), 91. <https://doi.org/10.3390/jmse9010091>.

Monitorização da Erosão Hídrica em Percursos Pedestres: Uma Proposta Metodológica baseada em LiDAR Móvel

Monitoring Water Erosion on Hiking Trails: A Methodological Proposal based on Mobile LiDAR

C. Pinheiro^{1*}, S. Pereira^{2,3}, A. Gomes²

¹ Mestrado em Sistemas de Informação Geográfica e Ordenamento do Território, Dep. de Geografia, Faculdade de Letras da Universidade do Porto; Via Panorâmica, s/n, 4150-564 Porto; up202308828@up.pt

² Centro de Estudos em Geografia e Ordenamento do Território, Faculdade de Letras da Universidade do Porto; Via Panorâmica, s/n, 4150-564 Porto

³ Centro de Estudos Geográficos, IGOT, Universidade de Lisboa; Rua Branca Edmée Marques, edifício IGOT. 1600-276, Lisboa

RESUMO

O presente trabalho avalia o uso de LiDAR móvel (*iPhone 13 Pro Max*) na monitorização da erosão em percursos pedestres. No PR3 MDB (Parque Natural do Alvão), obtiveram-se nuvens de pontos e ortomosaicos, com georreferenciação otimizada via algoritmo ICP (redução do RMSE de 0,361 m para 0,012 m). Através do método DoD, quantificaram-se processos de sulcagem após eventos de precipitação de 16 e 20 mm. Os resultados validam a aplicabilidade do LiDAR móvel na deteção de microvariações topográficas, revelando-se como uma solução robusta e replicável.

Palavras-chave: *Erosão hídrica; Percursos pedestres; LiDAR móvel; ICP; DoD*

Keywords: *Water erosion; Hiking trails; Mobile LiDAR; ICP; DoD*

1. INTRODUÇÃO

A crescente procura por atividades na natureza conferiu aos percursos um papel vital na saúde pública e na economia rural (Buckley & Chauvenet, 2022). No entanto, esta afluência intensifica a pressão sobre os ecossistemas. Muitos percursos derivam de caminhos históricos sem planeamento hidrológico (Marion, 2023), tornando-os vulneráveis à degradação quando o uso excede a sua capacidade de carga. O pisoteio contínuo provoca a compactação do solo, a perda de vegetação e a redução da porosidade, favorecendo o escoamento hortoniano (Pereira *et al.*, 2022). Adicionalmente, a geometria do traçado reorganiza a drenagem, aumentando a conectividade hidrológica e promovendo a erosão linear (sulcos e ravinas), o que empobrece a experiência do utilizador (Pinheiro *et al.*, 2025).

Face à rapidez e severidade destes processos, é imperativo desenvolver métodos de monitorização que superem as limitações das abordagens tradicionais (e.g., pins de erosão), caracterizadas por elevado esforço operacional. Neste contexto, a tecnologia LiDAR surge como alternativa, permitindo a geração de Modelos Digitais de Elevação (MDE) de elevada resolução espacial. A recente integração de sensores LiDAR em dispositivos móveis democratizou o acesso a dados de alta resolução de forma rápida e económica (Monsalve *et al.*, 2025). O presente estudo explora as potencialidades do LiDAR móvel na quantificação dos processos erosivos do percurso PR3-Fisgas do Ermelo, visando otimizar a monitorização da degradação física e garantir a sustentabilidade da infraestrutura.

2. ÁREA DE ESTUDO

O percurso PR3 MDB (Parque Natural do Alvão - PNA, Vila Real) possui 12,4 km e um desnível acumulado de 735 m (Costa, 2024). Caracteriza-se por relevo acentuado (Figura 1C), substrato xistoso e quartzítico e uma precipitação anual de 2600 mm. Esta exposição orográfica, aliada a declives acentuados e ao facto de ser o percurso mais frequentado do PNA (Costa, 2024), confere-lhe elevada suscetibilidade natural à erosão hídrica. O setor experimental selecionado (Figura 1D) caracteriza-se por escassa cobertura vegetal, exposição do solo e uma elevada inclinação de 27°, condições que favorecem o desempenho do sensor LiDAR. Esta escolha metodológica assegura a obtenção de nuvens de pontos de alta precisão, facilitando a deteção de microvariações topográficas.

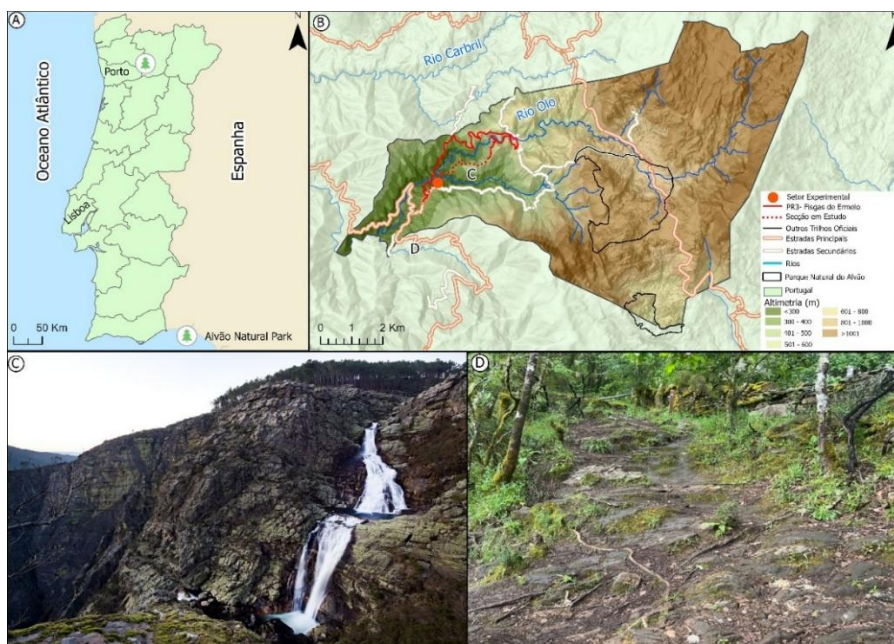


Figura 1. Enquadramento geográfico e caracterização da área de estudo: (A) Localização do Parque Natural do Alvão (PNA) no contexto de Portugal Continental; (B) Mapa hipsométrico e rede hidrográfica do PNA, com destaque para o traçado do percurso PR3 – Fisks de Ermelo e o setor experimental monitorizado; (C) Vista panorâmica das quedas de água das Fisks de Ermelo; (D) Vista do setor experimental

A dinâmica erosiva foi influenciada por dois eventos de precipitação sucessivos. O primeiro (30 de abril, > 20 mm) tem o potencial de promover a saturação hídrica do solo, reduzindo a sua capacidade de infiltração. O segundo (1 de maio, 16 mm/h) atuou sobre um solo já possivelmente saturado, potenciando o escoamento superficial imediato e o transporte de sedimentos. Em percursos com piso compactado, como o PR3, esta sucessão de eventos tem o potencial de facilitar a incisão promovida pelo escoamento superficial concentrado, mesmo sob intensidades de precipitação moderadas (Saputra *et al.*, 2024), sugerindo que a monitorização pode captar o efeito combinado da saturação antecedente e do impacto pluvial.

3. METODOLOGIA PROPOSTA

A monitorização da dinâmica erosiva baseou-se na comparação multitemporal de levantamentos LiDAR móvel, realizados antes e após o evento pluviométrico.

Para a recolha de dados, utilizou-se um sensor LiDAR integrado no *iPhone 13 Pro Max* (através da aplicação *Polycam*), gerando nuvens de pontos densas e imagens RGB. Embora o sensor esteja limitado a um único retorno por pulso, o que limita a penetração em vegetação densa, a sua elevada densidade de amostragem em superfícies expostas revela-se adequada para a análise microtopográfica.

Complementarmente, a partir dos dados RGB, geraram-se ortomosaicos no *Agisoft Metashape* para validação visual das alterações.

Para a georreferenciação das nuvens de pontos, implantaram-se quatro pontos de controlo (GCPs) no setor monitorizado, georreferenciados com um GPS GNSS Diferencial *Emlid Reach RX*. O processamento foi realizado no *CloudCompare v2.14*, seguindo duas etapas:

1. Georreferenciação absoluta com base nos GCPs.

2. Correção através do algoritmo *Iterative Closest Point (ICP)*, que minimiza as distâncias entre pontos homólogos das nuvens de pontos, através de transformações rígidas, corrigindo erros residuais de inclinação (*tilt*) e translação.

Nesta fase, ajustou-se o parâmetro *theoretical overlap* para 30%, que estima a percentagem de áreas sobrepostas entre as nuvens de pontos, garantindo que o alinhamento considere apenas a geometria estável do percurso, minimizando o ruído. Este refinamento permitiu uma redução significativa do erro, traduzida numa melhoria de 96,47% no setor Pré (de 0,361 m para 0,013 m) e de 97,47% no setor Pós (de 0,517 m para 0,013 m) (Quadro 1). Estes resultados fixaram o RMSE final na ordem dos 0,012 m, assegurando a fiabilidade necessária para a deteção de mudanças e análise multitemporal, validando a precisão do método (Forkuo *et al.*, 2023).

A fase final consistiu na análise volumétrica realizada no *ArcGis Pro 3.5* através do método *DEM of Difference (DoD)*. Foram gerados Modelos Digitais de Elevação (MDE) com resolução espacial de 0,03 m (2 a 4 vezes o *point spacing*), minimizando a ocorrência de células vazias. O volume total da variação foi calculado pela subtração dos MDEs, aplicando-se máscaras de exclusão (vegetação), garantindo que os resultados refletissem apenas alterações na topografia do percurso.

Quadro 1. Parâmetros de processamento e indicadores de precisão das nuvens de pontos LiDAR: comparação dos erros residuais (RMSE) pré e pós-aplicação do algoritmo *Iterative Closest Point (ICP)* e caracterização métrica dos levantamentos

Setor	RMSE Inicial (m)	RMSE Pós-ICP (m)	<i>Theoretical overlap</i> (%)	Redução do erro (%)	Nº de pontos	Espaçamento entre os pontos (m)	Resolução Espacial (m)
Pré	0,361	0,013	30	96,47	287100	0.011	0.03
Pós	0,517	0,013	30	97,47	269640	0.010	0.03

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES FINAIS

A análise comparativa entre os levantamentos revela uma resposta clara aos eventos pluviométricos. A interpretação visual das ortofotos (Figura 2C-D) evidencia a remoção da camada superficial, sendo particularmente evidente a perda de cobertura vegetal. Esta dinâmica é quantificada pelo modelo DoD (Figura 2A), que demonstra a predominância de processos erosivos na parte superior do percurso, com incisões que atingem -28,79 cm. Em contrapartida, as manchas de deposição atingem 37,90 cm em zonas de acumulação de sedimentos. Estatisticamente, o histograma de erosão *versus* deposição (Figura 2B) apresenta uma média negativa de -0,42 cm e uma distribuição assimétrica, o que confirma que a perda de volume superou os ganhos por deposição.

A metodologia baseada em LiDAR móvel, com recurso ao *iPhone 13 Pro Max*, demonstrou ser uma ferramenta robusta para a monitorização de percursos pedestres. A redução do RMSE por meio do algoritmo ICP valida a utilização de dispositivos móveis para fins científicos, oferecendo precisão comparável à dos métodos tradicionais, com um esforço logístico reduzido. A convergência entre a análise visual das ortofotos e a quantificação volumétrica por meio de DoD reforça a fiabilidade do sensor na deteção de microalterações morfológicas. Para além da eficácia local no PR3, a metodologia apresentada destaca-se pela replicabilidade, tornando-se um protocolo escalável para qualquer rede de percurso.

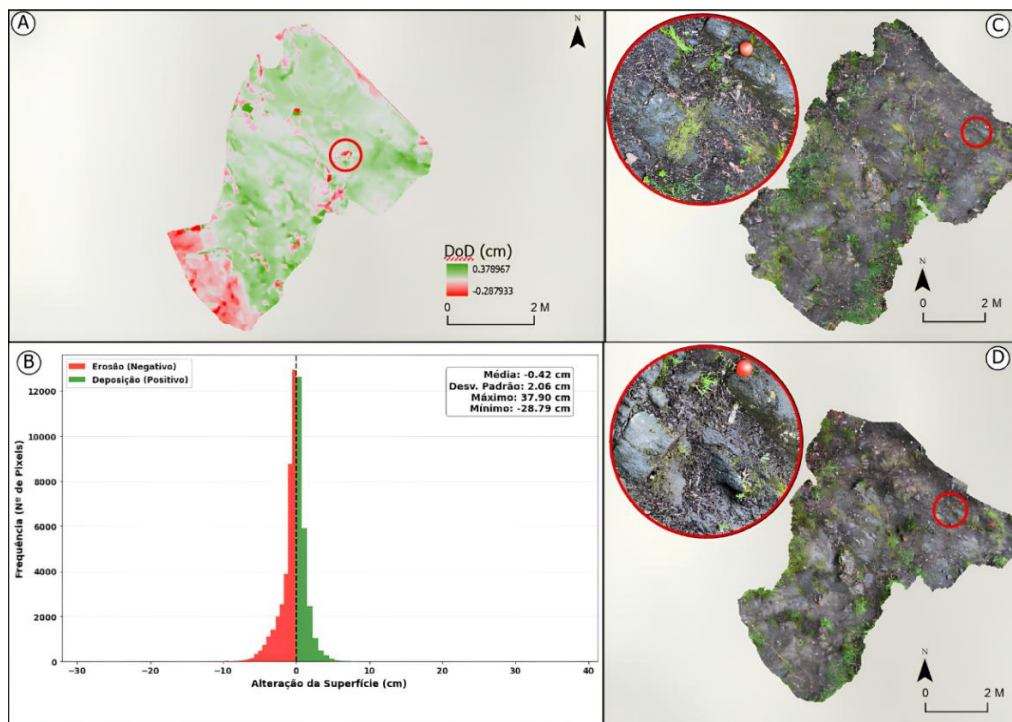


Figura 2. Dinâmica erosiva no setor experimental: (A) DoD (cm) com áreas de erosão (vermelho) e deposição (verde); (B) Histograma de variação altimétrica; (C) e (D) Ortofotos pré e pós-evento, destacando a perda de vegetação e exposição do substrato

Referências

- Buckley, R., & Chauvenet, A. L. (2022). Hidden economic counterflows in post-COVID international wildlife tourism. *Biological Conservation*, 268, Artigo 109505. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2022.109505>
- Costa, J., Gomes, A., Stokes, M., & Saraiva, M. (2024). Recreational use of protected areas: spatiotemporal insights from the Wikiloc mobile app. *Current Issues in Tourism*, 27(22), 3978-3998.
- Forkuo, G., & Borz, S. (2023). Accuracy and inter-cloud precision of low-cost mobile LiDAR technology in estimating soil disturbance in forest operations. *Frontiers in Forests and Global Change*, 6, Artigo 1224575. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2023.1224575>
- Marion, J. L. (2023). Trail sustainability: A state-of-knowledge review of trail impacts, influential factors, sustainability ratings, and planning and management guidance. *Journal of Outdoor Recreation and Tourism*, 43, 100656. <https://doi.org/10.1016/j.jort.2023.100656>
- Monsalve, A., Yager, E. M., & Tonina, D. (2025). Evaluating Apple iPhone LiDAR measurements of topography and roughness elements in coarse bedded streams. *Journal of Ecohydraulics*, 10(2), 181-191. <https://doi.org/10.1080/24705357.2024.2312345>
- Pereira, L., Rodrigues, A., Jorge, M., Guerra, A., Booth, C., & Fullen, M. (2022). Detrimental effects of tourist trails on soil system dynamics in Ubatuba Municipality, São Paulo State, Brazil. *Catena*, 216, Artigo 106431. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106431>
- Pinheiro, C., Costa, J., Pereira, S., & Gomes, A. A. (2025). Assessment of water erosion on hiking trails in Alvão Natural Park, Portugal. *Repositório Aberto da Universidade do Porto*. <http://hdl.handle.net/10216/143522>
- Saputra, D., Putra, A. N., Sari, R. R., Ishaq, R. M., Hadiwijoyo, E., Hadi, M., & Suprayogo, D. (2024). Stay on trails: Detrimental effects of recreational activities on soil compaction and infiltration. *Journal of Degraded and Mining Lands Management*, 11(4), 6213-6223. <https://doi.org/10.15243/jdmlm.2024.114.6213>

Deslizamentos na região de Lisboa: deteção e monitorização através de interferometria radar

Landslides in the Lisboa region: detection and monitoring using radar interferometry

M. Tafula^{1*}, J. L. Zêzere^{2 3}

¹ Universidade de Lisboa, Instituto de Geografia e Ordenamento do Território, estudante de mestrado, R. Branca Edmée Marques, 1600-276 Lisboa

² Universidade de Lisboa, Instituto de Geografia e Ordenamento do Território, Centro de Estudos Geográficos, R. Branca Edmée Marques, 1600-276 Lisboa

³ Laboratório Associado TERRA

*mtafula@edu.ulisboa.pt

RESUMO

O estudo faz a deteção de deslizamentos ativos e a monitorização de deslocamentos tangenciais na região de Lisboa através de interferometria radar, concretamente da técnica de *Multi-Temporal - Interferometric Synthetic Aperture Radar* (MT-InSAR). Foram utilizados dados MT-InSAR do *European Ground Motion Service* (EGMS), derivados de imagens Sentinel-1, em órbitas ascendentes e descendentes, para o período de 2019–2023. A deteção e classificação das Áreas de Deformação Ativa (ADAs) foi realizada com recurso à ferramenta ADAtools, aplicando-se um limiar mínimo de velocidade de deformação de 5 mm/ano. A identificação de ADAs relativas a deslizamentos baseou-se na análise integrada de variáveis geomorfológicas e geológicas, incluindo declive, exposição das vertentes, litologia e direção da deformação. Realizou-se validação no terreno para identificar evidências de deslizamentos nas ADAs. Foram identificadas 24 ADAs associadas a deslizamentos, das quais quatro coincidem com áreas previamente inventariadas. As velocidades médias de deformação variam entre 4,29 mm/ano e 8,34 mm/ano, ocorrendo preferencialmente em margas e pelitos da Formação de Abadia (Jurássico superior). Os resultados demonstram o potencial do MT-InSAR como ferramenta complementar para a monitorização de deslizamentos na região de Lisboa.

Palavras-chave: *deslizamentos; MT-InSAR; EGMS; ADAtools*

Keywords: *landslides; MT-InSAR; EGMS; ADAtools*

1. INTRODUÇÃO

Os deslizamentos constituem um fenómeno geomorfológico com impactes sociais, económicos e ambientais, sendo neste estudo caracterizados pelo deslocamento de uma massa de solo ou rocha ao longo de uma superfície de rotura bem definida, com deformação interna reduzida, de acordo com a classificação de Cruden & Varnes, 1996.

Técnicas de Interferometria Radar (InSAR), nomeadamente a abordagem Multi-Temporal - InSAR (MT-InSAR), permitem detetar deslocamentos superficiais à escala milimétrica e monitorizar movimentos lentos dificilmente identificáveis por métodos convencionais (Crosetto et al., 2016). A técnica de MT-InSAR para a deteção e monitorização de deslizamentos, carece, contudo, de validação sistemática no terreno.

Os objetivos deste estudo são: (1) detetar e monitorizar deslizamentos através de MT-InSAR; (2) distinguir entre deslizamentos previamente conhecidos e novos deslizamentos detetados; e (3)

verificar no terreno a existência de evidências associadas aos deslizamentos identificados, sem recurso a instrumentação invasiva.

2. ÁREA DE ESTUDO, DADOS E MÉTODOS

2.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo localiza-se a norte de Lisboa e corresponde a um quadrado com 25 km de lado (aproximadamente 265 km²), abrangendo os municípios de Arruda dos Vinhos, Sobral de Monte Agraço, Vila Franca de Xira e Loures (Figura 1).

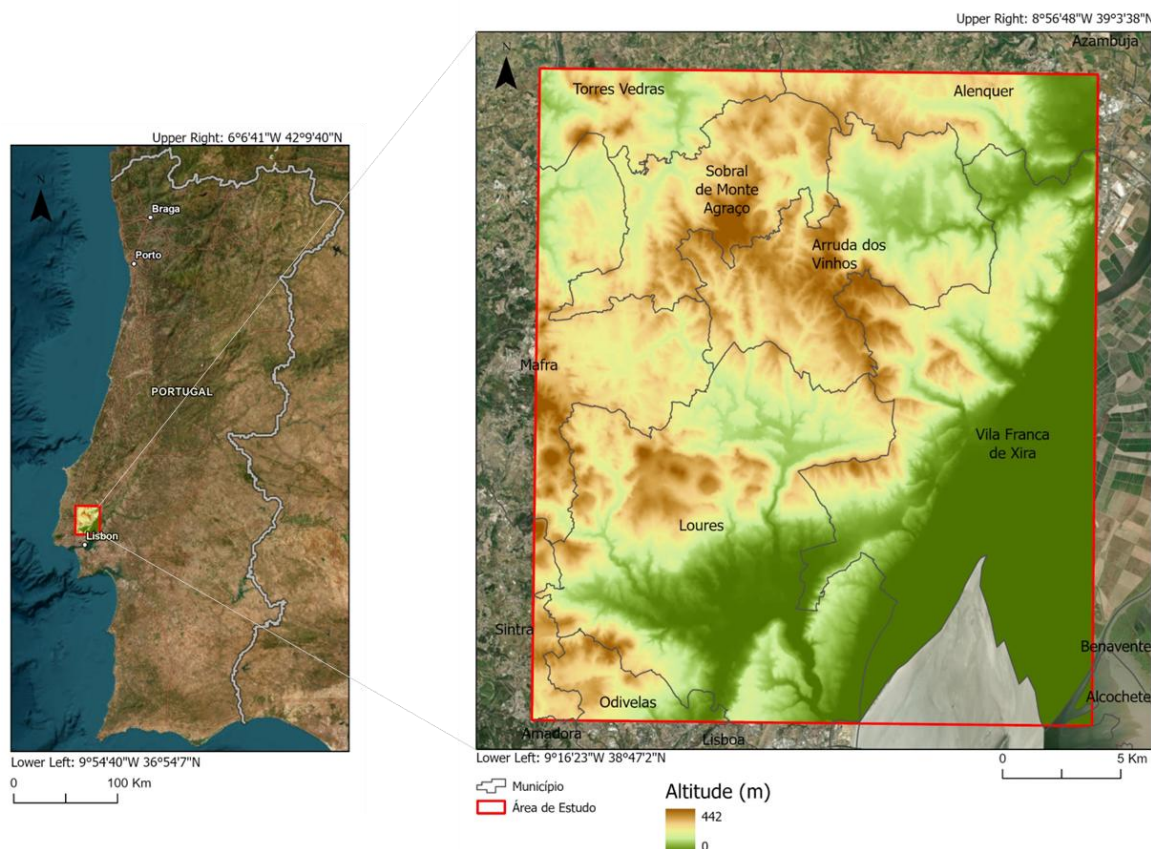


Figura 1. Localização da área de estudo

2.2 DADOS

Foram utilizados dados MT-InSAR disponibilizados pelo *European Ground Motion Service* (EGMS), derivados de imagens Sentinel-1 da Agência Espacial Europeia, em órbitas ascendentes e descendentes, para o período de 2019–2023 (correspondente ao período máximo disponibilizado à data de abril de 2026). Os dados são fornecidos em formato vetorial e consistem em medições pontuais que representam dispersores persistentes (*persistent scatterers*, PS) e dispersores distribuídos (*distributed scatterers*, DS).

2.3 MÉTODOS

A deteção, análise e classificação das Áreas de Deformação Ativa (ADA) foi realizada com recurso à ferramenta ADAtools (Barra et al., 2017; Navarro et al., 2020), aplicando-se um limiar mínimo de velocidade de deformação de 5 mm/ano.

A identificação de ADAs compatíveis com deslizamentos baseou-se na análise integrada de variáveis geomorfológicas e geológicas, incluindo o declive, a exposição das vertentes, a litologia e a direção da deformação. Foram considerados limiares de declive de 5° e 10°. As ADAs classificadas como

deslizamentos foram cruzadas com um inventário previamente existente (Villaça et al., 2026). Um conjunto de ADAs, selecionado com base na sua área, presença de edificado e acessibilidade, foi validado através de campanhas de campo.

3 RESULTADOS

Foram identificadas 24 Áreas de Deformação Ativa associadas a deslizamentos (Figura 2), das quais 11 correspondem a dados de órbita ascendente e 13 a dados de órbita descendente. Das 24 ADAs identificadas, quatro coincidem com áreas previamente identificadas como deslizamentos.

As velocidades médias de deformação variam entre 4,29 mm/ano e 8,34 mm/ano, ocorrendo preferencialmente em margas e pelitos da Formação de Abadia (Jurássico superior). Metade das ADAs localizam-se em vertentes com declives compreendidos entre $]5^\circ$ e $10^\circ[$, enquanto as restantes se situam em declives superiores a 10° .

Todas as ADAs validadas no terreno apresentaram evidências de deslizamento, demonstrando a reativação de movimentos previamente conhecidos e a deteção de novos deslizamentos.

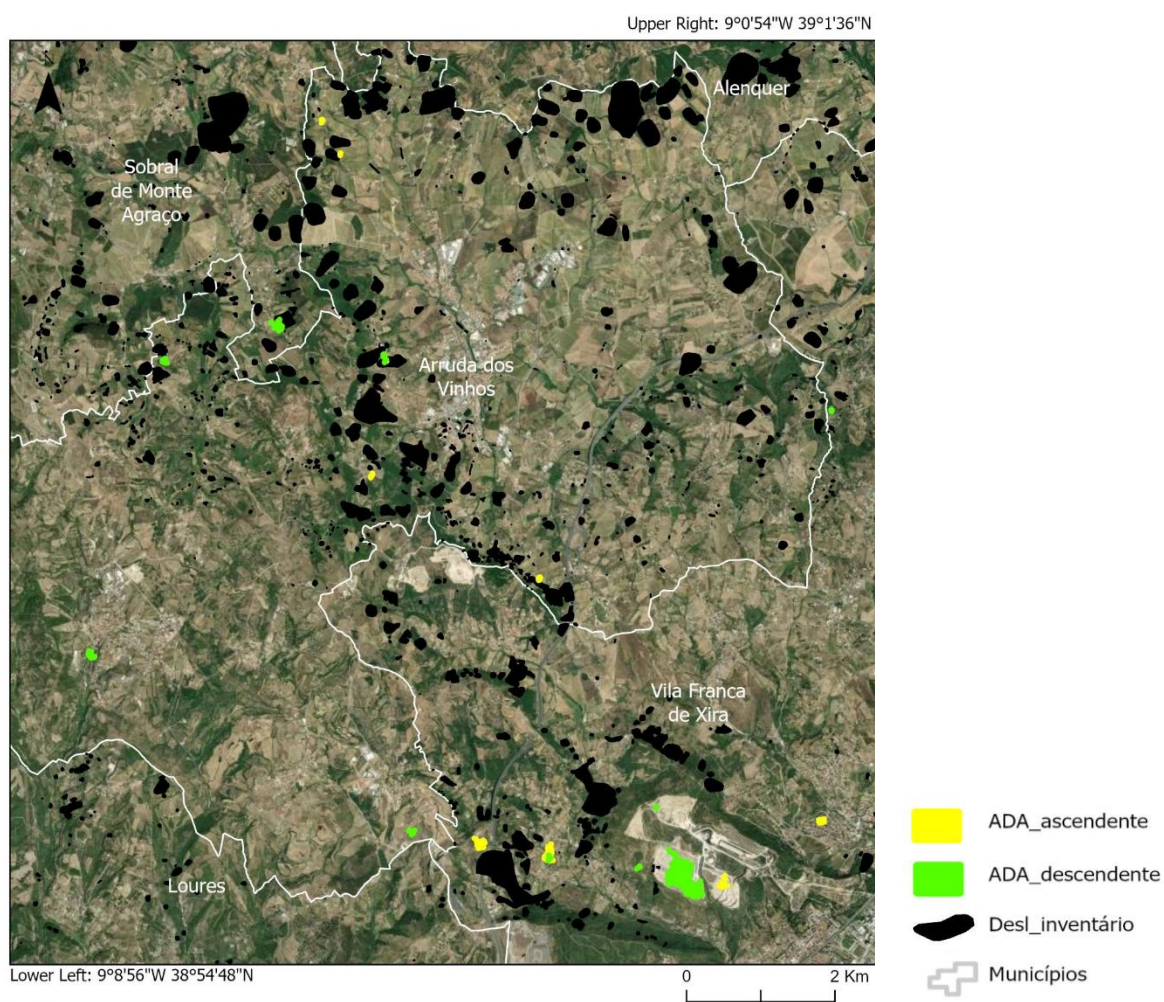


Figura 2 . Áreas de Deformação Ativa, nas órbitas ascendente e descendente, e deslizamentos do inventário

4. CONCLUSÃO

O estudo demonstrou o potencial da técnica MT-InSAR para a deteção e monitorização de deslizamentos ativos na região de Lisboa. A aplicação de dados MT-InSAR do *European Ground Motion*

Service (EGMS) e a utilização da ferramenta ADAtools possibilitou a identificação de 24 Áreas de Deformação Ativa (ADAs) associadas a deslizamentos, distribuídas por órbitas ascendentes e descendentes.

Os resultados evidenciaram que uma parte significativa das ADAs identificadas corresponde a deslizamentos previamente não inventariados. A validação de campo confirmou a presença de evidências associadas a deslizamentos em todas as ADAs analisadas (e.g. fissuração em elementos rígidos como muros e paredes), demonstrando a fiabilidade da abordagem adotada.

Apesar dos resultados obtidos, o estudo apresenta algumas limitações. A análise baseou-se exclusivamente em dados MT-InSAR do período 2019–2023, o que restringe a avaliação a movimentos ativos nesse intervalo temporal. Adicionalmente, a deteção de deformações está condicionada à densidade e distribuição de dispersores PS e DS, podendo algumas áreas instáveis não serem identificadas. A validação de campo incidiu apenas sobre um subconjunto das ADAs identificadas, em função de critérios de acessibilidade e presença de edificado, não permitindo a confirmação direta de todas as áreas detetadas.

Ainda assim, os resultados obtidos confirmam a utilidade da MT-InSAR como ferramenta complementar às metodologias tradicionais, contribuindo para monitorização da instabilidade de vertentes na região de Lisboa.

Agradecimentos

Este trabalho foi apoiado pelo projeto EGMS RASTOOL-DoS: European Ground Motion Risk Assessment Tools - Downstream Service (UCPM-2024-KAPP-PP – 101193210).

Referências

- Barra, A., Solari, L., Béjar-Pizarro, M., Monserrat, O., Bianchini, S., Herrera, G., Crosetto, M., Sarro, R., González-Alonso, E., Mateos, R. M., Ligüerzana, S., López, C., & Moretti, S. (2017). A methodology to detect and update active deformation areas based on Sentinel-1 SAR images. *Remote Sensing*, 9(10). <https://doi.org/10.3390/rs9101002>
- Crosetto, M., Monserrat, O., Cuevas-González, M., Devanthéry, N., & Crippa, B. (2016). Persistent Scatterer Interferometry: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115, 78–89. <https://doi.org/10.1016/J.ISPRSJPRS.2015.10.011>
- Cruden, D. M., & Varnes, D. J. (1996). Landslide types and processes. In A. K. Turner & R. L. Schuster (Eds.), *Landslides: Investigation and mitigation* (Special report 247, pp. 36–75). National Academy Press.
- Navarro, J. A., Tomás, R., Barra, A., Pagán, J. I., Reyes-Carmona, C., Solari, L., Vinielles, J. L., Falco, S., & Crosetto, M. (2020). ADAtools: Automatic detection and classification of active deformation areas from PSI displacement maps. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(10). <https://doi.org/10.3390/ijgi9100584>
- Villaça, C., Santos, P. P., Morais, A. R., Oliveira, S. C., & Zêzere, J. L. (2026). Unveiling the drivers of rainfall-triggered landslide spatial distribution: Insights from event-based and historical landslide inventories in Lisbon region, Portugal. *Geomorphology*, 500, 110222. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2026.110222>.

Análise de risco de estabilidade de taludes costeiros suportada por dados UAV-GPS de alta resolução: estudo exploratório

Coastal slope stability risk analysis supported by high-resolution UAV-GPS data: exploratory study

J. Antunes¹, J. Costa², J. Teixeira^{2,1*}, P. Moreira^{3,4}, L. Freitas^{1,5}, A. Pires⁶, C. F. Rodrigues^{3,4,7}, H. I. Chaminé^{1,5}

¹ Laboratório de Cartografia e Geologia Aplicada (LABCARGA), Departamento de Engenharia Geotécnica, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, Portugal

² Centro de Estudos em Geografia e Ordenamento do Território (CEGOT), Departamento de Geografia, Faculdade de Letras da Universidade do Porto, Porto, Portugal

³ I3ID – Fundação e Universidade Fernando Pessoa, Porto, Portugal

⁴ MARE – Centro de Ciências do Mar e do Ambiente, Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal

⁵ Centro GeoBioTec|UA, Aveiro, Portugal

⁶ INESC TEC, Centro de Robótica e Sistemas Autónomos (CRAS|LSA), Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, Portugal

⁷ Academia das Ciências de Lisboa, Lisboa, Portugal

* jateixeira@letras.up.pt

RESUMO

Este trabalho apresenta uma metodologia preliminar para a avaliação da estabilidade em taludes costeiros, centrando-se na transição de dados de observação remota genéricos para dados de alta precisão obtidos por sistemas aéreos não tripulados (UAV). A abordagem replica e aprimora uma matriz de risco multifásica anteriormente baseada em imagens de satélite, utilizando agora fotogrametria aérea apoiada em GPS-RTK e dados LiDAR da DGT (Direção-Geral do Território). Esta substituição permite uma quantificação rigorosa de parâmetros, como a inclinação, a altura e o recuo de cristas, eliminando erros sistemáticos de interpretação visual. Os resultados preliminares demonstram que a precisão centimétrica é fundamental para a fiabilidade dos índices de risco em taludes costeiros.

Palavras-chave: *Geomorfologia costeira, Matriz de risco, UAV-GPS, Fotogrametria, Detecção remota.*

Keywords: *Coastal geomorphology, Risk matrix, UAV-GPS, Photogrammetry, Remote sensing.*

1. INTRODUÇÃO

A dinâmica geomorfológica das zonas costeiras, em particular nos sistemas de arribas e taludes, caracteriza-se por processos de instabilidade que geram riscos geomorfológicos e geotécnicos significativos. A monitorização destes sistemas tem-se apoiado, com frequência, em metodologias expeditas baseadas em dados genéricos e em plataformas de acesso livre, como o Google Earth Pro, utilizadas para a quantificação de recuos da linha de arriba e para a identificação de patologias estruturais. Embora úteis para uma triagem inicial, estas ferramentas apresentam limitações críticas na resolução espacial e na precisão altimétrica, o que dificulta uma avaliação geotécnica rigorosa necessária ao ordenamento do território.

O presente estudo descreve uma investigação em curso no Litoral de Peniche que visa otimizar a fiabilidade da caracterização da estabilidade em taludes costeiros através da integração de dados de sensores remotos de alta resolução. O foco reside na aplicação de metodologias de cartografia por Veículos Aéreos Não Tripulados (UAV) com suporte de sistemas de posicionamento global GPS-RTK (Choi et al., 2023; Ding et al., 2024). Esta abordagem permite adaptar uma metodologia de matriz de risco pré-existente — baseada na análise combinada de parâmetros espaciais, de gabinete e de campo — para um novo nível de precisão centimétrica, significativamente mais robusto do ponto de vista geométrico (Feng et al., 2024). O trabalho explora a complementaridade entre os modelos gerados por UAV e os dados LiDAR (Light Detection and Ranging) disponibilizados pela Direção-Geral do Território (DGT), visando estabelecer um protocolo de análise da estabilidade mais robusto e menos dependente da subjetividade do observador.

2. METODOLOGIA E DADOS

A estrutura metodológica foi aplicada à área em estudo e adota uma matriz de risco segmentada que avalia a perigosidade através de um índice ponderado. Este índice é alimentado por três grupos de descritores fundamentais que, na presente abordagem, foram redefinidos para integrar exclusivamente dados de alta fiabilidade.

O primeiro grupo de descritores concentra-se na morfometria e no histórico do talude. A altura do talude e a sua inclinação média, tradicionalmente estimadas a partir de perfis topográficos de baixa resolução, são aqui extraídas de Modelos Digitais de Elevação (MDE) gerados por fotogrametria aérea (Choi et al., 2023). O recuo da crista, um indicador crítico, é calculado através da sobreposição de ortofotomapas de alta resolução com os dados históricos do LiDAR aéreo da DGT, permitindo detetar variações métricas que seriam impercetíveis em imagens de satélite convencionais.

O segundo grupo de análise foca-se na evidência de potencial de instabilidade e na geologia local. Aqui, a utilização de sensores UAV permite uma inspeção detalhada da face do talude, identificando a presença de blocos instáveis, fendas de tração e a acumulação de blocos rochosos no sopé. A capacidade de obter imagens oblíquas de alta resolução permite caracterizar a continuidade das camadas e identificar superfícies de descontinuidade que condicionam as roturas.

No que respeita à aquisição de dados, o fluxo de trabalho iniciou-se com o estabelecimento de uma rede de pontos de controlo no solo (GCPs) georreferenciados com equipamento GNSS de dupla frequência em modo RTK. Os voos de mapeamento foram realizados a baixa altitude (Tysiāc et al., 2025), garantindo uma distância de amostragem no solo (GSD) inferior a 3 cm/pixel. O processamento fotogramétrico subsequente gerou nuvens de pontos densas, que foram filtradas para remoção de vegetação, garantindo que as métricas de inclinação e altura extraídas correspondam à superfície real do maciço rochoso ou terroso.

3. RESULTADOS PRELIMINARES E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos até à data demonstram uma disparidade significativa entre os dados extraídos de fontes globais (como imagens de satélite) e os modelos de alta resolução UAV-GPS. A precisão na delimitação da crista do talude revelou-se um dos fatores mais diferenciadores. Enquanto em metodologias anteriores a margem de erro na identificação da crista podia ascender a vários metros devido a sombras ou à vegetação, os atuais ortofotomapas permitem uma definição precisa ao nível do decímetro.

A análise da inclinação dos taludes através dos Modelos Digitais de Elevação de alta resolução permitiu identificar setores com inclinações superiores a 70° que não eram detetados em cartografia a escalas

de menor detalhe. Este pormenor é crucial, uma vez que a matriz de risco penaliza severamente inclinações próximas da verticalidade. Além disso, a capacidade de visualizar e quantificar o volume de blocos caídos no sopé do talude — através da comparação de nuvens de pontos de diferentes épocas — fornece um indicador objetivo da atividade erosiva recente.

A integração dos dados LiDAR da DGT serviu como um importante referencial para a validação dos modelos de superfície, especialmente em áreas de topografia mais complexa. A discussão preliminar indica que a utilização de dados de alta fiabilidade não só torna a matriz de risco mais precisa, como também reduz a variabilidade dos resultados entre diferentes técnicos, uma vez que as métricas passam a ser extraídas de modelos matemáticos rigorosos obtidos com voos multiângulo (James e Robson, 2014). Verificou-se que a abordagem UAV-GPS é particularmente eficaz na deteção precoce de fendas de tração na crista, permitindo antecipar fenómenos de instabilidade antes de ocorrerem movimentos de massa em grande escala.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta investigação preliminar reforça a necessidade de adotar métodos de monitorização de alta resolução no contexto da gestão dos riscos costeiros. A metodologia baseada em sistemas integrados UAV–GPS, complementada por dados de LiDAR aéreo, revelou-se claramente superior na quantificação dos parâmetros morfológicos e estruturais que alimentam as matrizes de estabilidade de taludes. A elevada fiabilidade dos dados recolhidos permite uma avaliação do risco mais robusta e segura, fundamental para a definição de zonas de exclusão, bem como para o planeamento e a hierarquização de intervenções de engenharia costeira.

Como desenvolvimento futuro, prevê-se o processamento e a integração dos dados obtidos por LiDAR Terrestre (TLS). Embora os varrimentos já tenham sido realizados, a complexidade do processamento computacional e a necessidade de aplicação de algoritmos específicos de co-registo com as nuvens de pontos aéreas impediram a sua inclusão nesta fase preliminar do estudo. A futura incorporação do LiDAR terrestre permitirá uma caracterização ainda mais detalhada da rugosidade da face do talude e da orientação precisa das famílias de descontinuidades, refinando significativamente as componentes geológico-estrutural e geomecânica da análise de estabilidade.

Agradecimentos

Esta investigação teve o apoio do Centro de Estudos de Geografia e Ordenamento do Território (CEGOT), financiado por fundos nacionais, através da Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT), com a referência UIDB/04084/2025. O trabalho recebeu financiamento de um contrato de investigação da FCT para AP (CEECIND/00835/2018|doi.org/10.54499/CEECIND/00835/2018/CP1580/CT0002) e UID/50014/2023 – DOI 10.54499/UID/50014/2023|doi.org/10.54499/UID/50014/2023. Adicionalmente, este trabalho foi parcialmente apoiado pelo programa de reequipamento do LABCARGA|ISEP (IPP-ISEP|PAD'2007/08) e pelo Centro GeoBioTec|UA (UID/GEO/04035/2025). Gratos à Direção-Geral do Território (DGT) pela partilha de dados geoespaciais.

Referências

- Choi, S.-K., Ramirez, R. A., & Kwon, T.-H. (2023). Acquisition of high-resolution topographic information in forest environments using integrated UAV-LiDAR system: System development and field demonstration. *Heliyon*, 9(9), e20225. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e20225>
- Ding, Z., Xing, Y., Yang, S., Yin, B. Q., & Guo, Z. (2024). A point cloud registration method for UAV and TLS LiDAR based on ground features and the relationship of tree positions. *Journal of Central*

- South University of Forestry & Technology, 44(1), 14–27.
<https://doi.org/10.14067/j.cnki.1673-923x.2024.01.002>
- Feng, B., Nie, S., Wang, C., Wang, J., Xi, X., Wang, H., Lao, J., Yang, X., Wang, D., Chen, Y., & Yang, B. (2024). A novel method based on a starburst pattern to register UAV and terrestrial lidar point clouds in forest environments. *The Photogrammetric Record*, 39, 320–339. <https://doi.org/10.1111/phor.12487>
- Tysiąg, P., Ossowski, R., Janowski, Ł., & Moskalewicz, D. (2025). Utilizing UAV and orthophoto data with bathymetric LiDAR in Google Earth Engine for coastal cliff degradation assessment. *Scientific Reports*, 15, 704. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-84404-1>
- James, M. R., & Robson, S. (2014). Mitigating systematic error in topographic models derived from UAV and ground-based image networks. *Earth Surface Processes and Landforms*, 39, 1413–1420. <https://doi.org/10.1002/esp.3609>

Deteção de estruturas mineiras abandonadas (poços) através de dados LiDAR de alta resolução (NW de Portugal)

Detection of abandoned mining structures (pits) using high-resolution LiDAR data (NW Portugal)

R. Gutierrez¹, J. Teixeira^{2,1*}, M. J. Dias Costa³, H. I. Chaminé^{1,4}

¹ Laboratório de Cartografia e Geologia Aplicada (LABCARGA), Departamento de Engenharia Geotécnica, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, Portugal

² Centro de Estudos em Geografia e Ordenamento do Território (CEGOT), Departamento de Geografia, Faculdade de Letras da Universidade do Porto, Porto, Portugal

³ Património Cultural I.P., D.P.O., Mosteiro de São Martinho de Tibães, Braga, Portugal

⁴ Centro GeoBioTec|UA, Aveiro, Portugal

* jateixeira@letras.up.pt

RESUMO

O presente trabalho apresenta uma metodologia para a identificação de poços de prospeção e de pesquisa mineira abandonados na região de Mire de Tibães (Braga), recorrendo à análise de dados LiDAR (Light Detection and Ranging). A densa cobertura florestal que caracteriza a área de estudo constitui um obstáculo significativo ao reconhecimento geomorfológico tradicional, dificultando o inventário completo de estruturas históricas de pequena escala. A metodologia baseou-se no processamento e na filtragem de nuvens de pontos para a geração de Modelos Digitais de Terreno (MDT) com resoluções centimétricas (0,25 m e 0,50 m). A análise permitiu a identificação de micro-relevos característicos, como depressões circulares e depósitos de rejeitados adjacentes. Os resultados preliminares demonstram que o LiDAR permitiu identificar mais do dobro das estruturas anteriormente inventariadas, evidenciando o seu papel fundamental na gestão de riscos em áreas mineiras abandonadas.

Palavras-chave: LiDAR, MDT, Poços mineiros, Património geológico, Riscos Antropogénicos.

Keywords: LiDAR, DTM, Mining pits, Geological heritage, Anthropogenic hazards.

1. INTRODUÇÃO

A gestão de áreas mineiras abandonadas constitui um desafio crescente no âmbito do ordenamento do território, em particular no que se refere à identificação de passivos ambientais e à avaliação de riscos geotécnicos associados. Na região de Mire de Tibães (Braga, Noroeste de Portugal), o legado da exploração de volfrâmio e cassiterite (Ferreira et al., 2000; Meixedo et al., 2011; Chaminé et al., 2017), desenvolvida maioritariamente durante a primeira metade do século XX, materializa-se numa densa e complexa rede de galerias subterrâneas e de poços de prospeção, pesquisa e extração vertical (e.g., Meixedo et al., 2011; Lopes et al., 2015; Chaminé et al., 2017; Pires et al., 2023).

Estudos anteriores realizados nesta área, recorrendo a tecnologias de deteção remota, como o DInSAR (Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar), identificaram padrões de deformação superficial e taxas de subsidência significativas, frequentemente controladas pela estruturação tectónica regional. No entanto, a eficácia do mapeamento de campo nas vertentes afetadas é fortemente condicionada pela densa cobertura florestal e pela presença de um sub-bosque

praticamente impenetrável, que dificulta ou inviabiliza a observação direta das evidências morfológicas associadas às antigas frentes de exploração mineira.

Neste contexto, a aplicação da tecnologia LiDAR de alta resolução desempenha papel fundamental ao permitir a remoção digital da vegetação e a visualização detalhada da superfície do terreno. Esta capacidade constitui um aspeto crítico para a caracterização geomorfológica de detalhe, possibilitando a identificação precisa de estruturas mineiras abandonadas e contribuindo de forma decisiva para a avaliação integrada de riscos e para o apoio à gestão territorial destas áreas sensíveis.

2. METODOLOGIA

A metodologia aplicada neste estudo centrou-se no tratamento avançado de dados LiDAR com vista à extração de feições antropogénicas subtis. O processo teve início com a classificação rigorosa da nuvem de pontos, distinguindo os retornos associados à vegetação e às estruturas superficiais — utilizados na construção dos Modelos Digitais de Superfície (MDS) — dos retornos que efetivamente atingiram o solo. Atendendo à necessidade de detetar estruturas de escala métrica a decamétrica, procedeu-se à geração de Modelos Digitais de Terreno (MDT) com resoluções espaciais de 0,25 m e 0,50 m, assegurando a preservação da morfologia dos poços e das terrilhas associadas e evitando a suavização excessiva frequentemente observada em modelos de menor resolução espacial (Poggi et al., 2024).

Para potenciar a identificação visual destas estruturas, foram aplicadas diversas técnicas de visualização e de realce morfológico. Para além da elaboração de mapas de declives, foram gerados múltiplos modelos de sombreamento ('hillshades'), com variação sistemática dos ângulos de azimute e de altitude da fonte de iluminação (Kokalj e Somrak, 2019). Esta abordagem multidirecional permitiu mitigar os efeitos de ocultação decorrentes das sombras projetadas sobre encostas íngremes, bem como realçar os rebordos circulares característicos dos poços.

A análise incidiu na identificação de depressões pontuais que, tipicamente, apresentam acumulações semicirculares de material de rejeição (terrilhas) em pelo menos um dos bordos (Fernández-Lozano et al., 2019), constituindo um indicador diagnóstico da escavação manual histórica que caracteriza esta região mineira. A integração destes resultados num ambiente de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) possibilitou, adicionalmente, o cruzamento das anomalias detetadas com a cartografia geológica e estrutural da área de estudo, reforçando a interpretação geomorfológica e mineira das feições identificadas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise dos modelos digitais de alta resolução revelou uma realidade geomorfológica muito mais complexa do que a documentada anteriormente. Até à aplicação desta metodologia, o inventário de campo na área de Tibães contabilizava 14 poços confirmados e 9 estruturas inferidas (Figura 1), cuja verificação era dificultada pela acessibilidade e pela visibilidade no terreno. A aplicação do LiDAR permitiu não só validar estas localizações, mas também detetar um número considerável de novas anomalias morfológicas com características idênticas às dos poços mineiros conhecidos.

Os resultados preliminares indicam que o número de estruturas identificadas via LiDAR é superior ao dobro do registado anteriormente. Mais concretamente, as 23 estruturas previamente identificadas representam menos de 50% do total de poços mapeados até o momento. Esta discrepância sublinha a subestimação do impacto da atividade mineira na morfologia local e, consequentemente, do potencial risco de subsidência ou de colapso. Verificou-se que muitas destas novas estruturas se organizam em alinhamentos preferenciais, seguindo a orientação dos filões mineralizados e dos

principais lineamentos tectónicos, o que reforça a confiança na origem antropogénica destas feições. A resolução do modelo de 0,25 m permitiu, inclusive, definir o contorno cartográfico exato dos montes de rejeitos.



Figura 1. Exemplo de poço confirmado (ca. 1,5x1m, 12m de profundidade) e de estrutura inferida por depressão no terreno.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho demonstra que a análise de dados LiDAR de alta resolução constitui a metodologia mais eficaz para o inventário de estruturas mineiras em contextos de vegetação densa, nos quais o trabalho de campo tradicional se revela limitado ou insuficiente. A deteção de um número de poços significativamente superior ao previamente identificado altera substancialmente a percepção sobre a extensão da degradação física do terreno na área de Tibães, reforçando a necessidade de atualização sistemática da cartografia destas estruturas, bem como da implementação de medidas adequadas de proteção e segurança.

Atendendo ao carácter preliminar dos resultados apresentados, a próxima fase da investigação incidirá sobre a validação sistemática das novas estruturas identificadas. Este processo será suportado por campanhas de campo direccionadas, que recorrerão à tecnologia GPS RTK (Real Time Kinematic) de alta precisão, de modo a assegurar o posicionamento espacial rigoroso das estruturas cartografadas e inventariadas. A validação permitirá não só calibrar e otimizar os algoritmos de deteção automática, como também consolidar uma base de dados georreferenciada robusta, que servirá de suporte à proteção do património geomineiro, cultural e ambiental associado ao Mosteiro de Tibães e às áreas envolventes, bem como à mitigação de riscos para as comunidades locais e visitantes.

Agradecimentos

Esta investigação teve o apoio do Centro de Estudos de Geografia e Ordenamento do Território (CEGOT), financiado por fundos nacionais, através da Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT), com a referência UIDB/04084/2025. Adicionalmente, este trabalho foi parcialmente apoiado pelo programa de reequipamento do LABCARGA|ISEP (IPP-ISEP|PAD'2007/08) e pelo Centro GeoBioTec|UA (UID/GEO/04035/2025).

Referências

Chaminé, H. I., Lopes, M. E., Trigo, J. F., & Dias Costa, M. J. (Eds.). (2017). As minas de Tibães: Um património hidrogeológico, geomineiro e de hidráulica monástica/The Tibães mines: A

- hydrogeological, geomining and monastic hydraulic heritage. Coleção Labcarga-GEO|3. Laboratório de Cartografia e Geologia Aplicada & Departamento de Engenharia Geotécnica, Instituto Superior de Engenharia do Porto.
- Fernández-Lozano, J., Palao-Vicente, J. J., Blanco-Sánchez, J. A., Gutiérrez-Alonso, G., Remondo, J., Bonachea, J., Morellón, M., & González-Díez, A. (2019). Gold-bearing Plio-Quaternary deposits: Insights from airborne LiDAR technology into the landscape evolution during the early Roman mining works in north-west Spain. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 24, 843–855. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2019.03.001>
- Ferreira, N., Dias, G., Meireles, C., & Braga, M. A. S. (2000). Notícia explicativa da carta geológica de Portugal, escala 1:50 000, folha 5-D – Braga (2ª edição). Instituto Geológico e Mineiro, Lisboa.
- Giulio Poggi, Dallai, L., & Volpi, V. (2024). Mining under the canopy: Unveiling the archaeo-mining record in the Colline Metallifere with LiDAR analysis and multidisciplinary studies. *Quaternary International*, 705, 16–36. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2023.08.006>
- Kokalj, Ž., & Somrak, M. (2019). Why not a single image? Combining visualizations to facilitate fieldwork and on-screen mapping. *Remote Sensing*, 11(7), 747. <https://doi.org/10.3390/rs11070747>
- Lopes M. E., Afonso M. J., Teixeira J., Meixedo J. P., Trigo J. F., Dias Costa M. J., Gama Pereira L. C. & Chaminé H. I. (2015). Recovery of ancient groundwater supply systems and old abandoned mines: coupling engineering geosciences and geoheritage management. In G. Lollino, D. Giordan, C. Marunteanu, B. Christaras, I. Yoshinori, C. Margottini (Eds.), *Engineering Geology for Society and Territory – Preservation of Cultural Heritage*, IAEG, Springer, 8: 227-230.
- Meixedo, J. P., Lopes, M. E., Dias Costa, M. J., Trigo, J. F., & Chaminé, H. I. (2011). Geological and mining heritage in NW Portugal (Mire de Tibães): Threats and opportunities for a sustainable second life-cycle. In P. Cloughton & C. Mills (Eds.), *Mining perspectives: Proceedings of the 8th International Mining History Congress* (pp. 110–116). Cornwall Council.
- Pires, A., Dias, A., Santos, T., Amaral, A., Rodrigues, P., Almeida, J., Silva, E., & Chaminé, H. I. (2023). GeoTec: A system for 3D reconstruction in underground environment (Aveleiras Mine, Monastery of Tibães, NW Portugal). In H.I. Chaminé & J.A. Fernandes (Eds.), *Advances in geoengineering, geotechnologies, and geoenvironment for earth systems and sustainable georesources management* (pp. 147–153). *Advances in Science, Technology, and Innovation (ASTI)*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-25986-9_25

Integração de Dados LiDAR na Otimização de Rotas de Combate a Incêndios Florestais: Acessibilidade a Fontes de Água e Modelação Geomorfológica

Integration of LiDAR Data in the Optimization of Forest Fire Fighting Routes: Accessibility to Water Sources and Geomorphological Modeling

A. Viana¹, J. Teixeira^{2*}

¹ Mestrado em SIG e Ordenamento do Território, Faculdade de Letras da Universidade do Porto

² Centro de Estudos em Geografia e Ordenamento do Território (CEGOT), Faculdade de Letras da Universidade do Porto

* jateixeira@letras.up.pt

RESUMO

O combate a incêndios florestais exige ferramentas operacionais de apoio à decisão. Este trabalho foca-se na inventariação de pontos de água e no cálculo de rotas para diferentes tipologias de veículos (VLCI, VFCI, VTTU). Após uma validação no terreno num setor-piloto (Gondomar, Paredes e Penafiel), propõe-se agora a evolução do modelo analítico 2D através da integração de dados LiDAR da DGT. A extração de Modelos Digitais de Terreno e de Superfície permite calcular o declive das vias florestais e afinar a métrica da largura, penalizando o algoritmo de navegação em áreas geomorfológicamente complexas e maximizando a segurança das equipas.

Palavras-chave: *Incêndios florestais; Apoio à decisão; LiDAR; Modelação do relevo; Acessibilidade rodoviária.*

Keywords: *Forest fires; Decision support; LiDAR; Terrain modeling; Road accessibility.*

1. INTRODUÇÃO

Portugal é um dos países europeus mais fustigados por incêndios rurais, uma realidade cuja gravidade se reflete na perda de vidas humanas entre os operacionais. Os dados da Liga de Bombeiros Portugueses revelam que, desde 1980, em Portugal registaram-se 257 óbitos de bombeiros em serviço. Isto sublinha a necessidade imperativa de ferramentas de segurança e de consciência situacional (Golshani & Fang, 2025). O sucesso da supressão inicial do fogo depende intrinsecamente da disponibilidade e da acessibilidade aos recursos hídricos (Lourenço et al., 2021). No entanto, grande parte dos pontos de água cruciais não consta das bases de dados oficiais, e as redes viárias florestais presentes nos Planos Municipais de Defesa da Floresta contra Incêndios (PMDFCI) carecem frequentemente de detalhes tridimensionais. Neste contexto, foi desenvolvida uma plataforma *WebSIG* para otimizar a navegação operacional de veículos de combate. Numa primeira fase, as larguras das vias foram estimadas por fotointerpretação e validadas em trabalho de campo. A presente investigação propõe o aprimoramento desta infraestrutura tecnológica através da introdução de uma perspetiva geomorfológica, recorrendo à nova cobertura de dados LiDAR disponibilizada pela Direção-Geral do Território (DGT). A utilização de nuvens de pontos tridimensionais permite extrair não só a largura desimpedida da via (sem obstruções de copas ou de taludes), mas, sobretudo, o declive longitudinal e transversal do terreno. Sendo a topografia um fator determinante tanto para o

comportamento do fogo como para a tração de veículos pesados (como o Veículo Tanque Tático Urbano - VTTU), o objetivo deste estudo é demonstrar que a integração de métricas geomorfológicas num algoritmo de roteamento reduz o tempo de exposição ao risco e evita o aprisionamento das equipas pelo incêndio.

2. METODOLOGIA

O percurso metodológico deste trabalho estruturou-se em três etapas complementares: a inventariação de recursos hídricos, a modelação geomorfológica da rede viária e a implementação do algoritmo de apoio à decisão. A primeira etapa consistiu na criação de um inventário sistemático de pontos de água numa área-piloto de 49 km² que intersecta os municípios de Gondomar, Paredes e Penafiel. A base de dados inicial foi validada no terreno através da aplicação ArcGIS Field Maps, onde foram aferidos atributos de operacionalidade e medição de caudais (Canzian et al., 2018). A segunda etapa focou-se na modelação geomorfológica da rede viária recorrendo a dados LiDAR da Direção-Geral do Território (DGT) com resolução espacial de 50 cm. Este nível de detalhe é fundamental para capturar variações métricas no leito das vias florestais. A determinação do perfil longitudinal (declive) envolveu a aplicação da ferramenta *Interpolate Shape (3D Analyst)* sobre a rede vetorizada, convertendo a geometria 2D em 3D (*Z-aware*). Através da ferramenta *Add Z Information*, calculou-se o declive médio e máximo de cada troço, servindo esta métrica como variável de impedância no algoritmo de Dijkstra (Dijkstra, 1959; Golshani & Fang, 2025). Para a caracterização do perfil latitudinal e deteção de obstruções (gabarito transversal), utilizou-se a ferramenta *Generate Transects Along Lines* para criar perfis perpendiculares a intervalos de 20 metros. Estes transectos foram intersectados com o Modelo Digital de Superfície (MDS), permitindo não só detetar a inclinação lateral do terreno, mas também obstáculos marginais, como taludes ou vegetação densa que invada a via. O diferencial de altitude entre os extremos dos transectos permitiu calcular o ângulo de inclinação lateral, fator crítico para a estabilidade de veículos com centro de gravidade elevado (Figura 1). Finalmente, as rotas são calculadas comparando estas métricas geomorfológicas com as capacidades dinâmicas das viaturas (Quadro 1). O algoritmo bloqueia automaticamente segmentos em que a largura útil desimpedida ou a inclinação (longitudinal ou lateral) exceda os limites de segurança de cada classe de veículo.

Quadro 1. Restrições dimensionais, capacidades de carga e limites de declive (Norma EN 1846-1) para as viaturas de combate a incêndios parametrizadas no sistema.

Tipologia de Veículo	Capacidade de Água	Largura Mín.	Altura Máx.	Peso Máx.	Comp.	Declive Long. Máx.	Declive Lat. Máx.
VLCI (Ligeiro)	~500 L	2,0 m	3,5 m	3,5 t	6,0 m	40% – 60% (22º-31º)	15% – 20% (8º-11º)
VFCI (Pesado)	~3.500 L	3,0 m	4,0 m	14,0 t	8,0 m	50% – 60% (26º-31º)	20% – 30% (11º-17º)
VTTU (Cisterna)	~7.500 L	2,5 m	3,8 m	19,0 t	10,0 m	15% – 20% (8º-11º)	< 10% (~5º)



Figura 1. Tipologias de veículos de combate a incêndios utilizados em Portugal: VLCl - Veículo Ligeiro de Combate a Incêndios; VFCl - Veículo Florestal de Combate a Incêndios; VTTU - Veículo Tanque Tático Urbano (imagem gerada por Inteligência Artificial).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A fase de validação de campo revelou que a base de dados teórica apresenta fortes limitações: dos 48 pontos avaliados no setor-piloto, apenas 18 se confirmaram operacionais e acessíveis. Esta discrepância comprova a vulnerabilidade do planeamento baseado unicamente em cartografia bidimensional estática.

A introdução de dados LiDAR transformou a qualidade da análise de acessibilidade. Enquanto a fotointerpretação convencional através de ortofotomapas não reflete a orografia do terreno, o MDT derivado da nuvem de pontos LiDAR permitiu atribuir um valor de declive a cada segmento da via. O algoritmo de *Dijkstra*, ao processar estas novas restrições geomorfológicas, apresentou comportamentos distintos conforme a tipologia do veículo. Para um Veículo Ligeiro de Combate a Incêndios (VLCl), o sistema calculou rotas diretas por caminhos florestais íngremes, aproveitando a sua elevada manobrabilidade. Em contraste, para viaturas de grande porte, como o VTTU, o algoritmo excluiu automaticamente trechos com larguras residuais ou declives acentuados, propondo percursos alternativos mais longos, porém fisicamente viáveis e topograficamente seguros.

Este cruzamento entre o inventário exaustivo no terreno e a modelação geomorfológica atua como uma barreira preventiva contra decisões operacionais falíveis em cenários de stress, impedindo que viaturas pesadas entrem em caminhos onde o risco de encravamento ou a impossibilidade de inversão de marcha seriam fatais.

4. CONCLUSÕES

Este estudo evidencia que o avanço das ferramentas de Apoio à Decisão (DSS) no combate a incêndios não depende apenas do aumento do volume de dados, mas também da introdução de variáveis tridimensionais. A integração do declive e da largura exata através de dados LiDAR funde os princípios da geomorfologia com a logística de proteção civil.

O inventário validado de pontos de água, aliado a uma malha rodoviária sensível à topografia, constitui uma solução de elevado valor acrescentado. A plataforma WebSIG resultante não se limita a cartografar a água; processa matematicamente o relevo, garantindo que o socorro chega ao destino sem colocar a vida dos operacionais em risco face aos obstáculos físicos do território.

Agradecimentos

Esta investigação contou com o apoio do Centro de Estudos de Geografia e Ordenamento do Território (CEGOT), financiado por fundos nacionais através da Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT), com a referência UIDB/04084/2025.

Referências

- Canzian, W. P., Fiedler, N. C., Loureiro, E. B., & Berude, L. C. (2018). Eficiência do uso da água em métodos de combate a incêndios em florestas plantadas. *Nativa*, 6(3), 309. <https://doi.org/10.31413/nativa.v6i3.4778>
- Dijkstra, E. W. (1959). A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik*, 1(1), 269–271. <https://doi.org/10.1007/BF01386390>
- Golshani, F., & Fang, L. (2025). A fire navigation model: Considering travel time, impact of fire, and congestion severity. *Reliability Engineering & System Safety*, 259, 110914. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2025.110914>
- Lourenço, M., Oliveira, L. B., Oliveira, J. P., & Mora, A. (2021). An integrated decision support system for improving wildfire suppression management. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(8), 497. <https://doi.org/10.3390/ijgi10080497>

Monitorización de la dinámica de los arroyos estacionales de la Península Byers (Antártida) mediante cámaras time-lapse

Monitoring the dynamics of seasonal streams on the Byers Peninsula (Antarctica) using time-lapse cameras

J. Ruiz-Fernández^{1*}, M. A. de Pablo², R. Menéndez-Duarte³, J. Santos-González⁴, A. Fernández-Fernández⁵, L. Ferri-Hidalgo³, A. Gómez-Pazo⁴, C. A. Mansilla⁶, L. Núñez de Con¹, M. Van den Bergh⁷

¹ Departamento de Geografía, Univ. de Oviedo, C/ Amparo Pedregal s/n, 33011, Oviedo, España. * ruizjesus@uniovi.es

² Unidad de Geología, Universidad de Alcalá, 28805, Alcalá de Henares, Madrid, España.

³ Departamento de Geología, Universidad de Oviedo, C/ Jesús Arias de Velasco s/n, 33005, Oviedo, España.

⁴ Departamento de Geografía y Geología, Universidad de León, Campus de Vegazana s/n, 24071, León, España.

⁵ Departamento de Geografía, UNED, Ps/ Senda del Rey 7, 28040, Madrid, España.

⁶ Centro de Investigación GAIA Antártica, Universidad de Magallanes, Av/ Bulnes 01855, Punta Arenas, Chile.

⁷ Instituto Geográfico Nacional de Bélgica, Av/ Cortenbergh 115, 1000 Bruselas, Bélgica.

RESUMEN

Se monitorizó la dinámica de tres arroyos en la Península Byers (Antártida Marítima) mediante cámaras *time-lapse* entre febrero de 2023 y de 2026. La metodología permitió identificar cuatro fases sucesivas a lo largo del año: 1) circulación hídrica continua; 2) establecimiento progresivo de la nueva cubierta nival; 3) máxima extensión y espesor de la cubierta nival; y 4) inicio de la fusión nival y comienzo del drenaje de los arroyos. Los resultados muestran un funcionamiento estacional de los arroyos, con detención del caudal durante los meses más fríos. El instrumental demostró ser autónomo, resistente a condiciones extremas y de bajo coste, ofreciendo una herramienta eficaz para monitorizar procesos geomorfológicos polares.

Palabras clave: Cámaras *time-lapse*, arroyos, Península Byers, Isla Livingston, Antártida Marítima.

Keywords: *Time-lapse cameras, streams, Byers peninsula, Livingston Island, Maritime Antarctica.*

1. INTRODUCCIÓN

El uso de cámaras *time-lapse* tiene gran interés para monitorizar procesos geomorfológicos, ayudando a entender sus dinámicas, recurrencias, patrones temporales y velocidades (Eltner *et al.*, 2017). Es un instrumental de bajo coste, que puede funcionar autónomamente durante periodos temporales largos (anuales), bajo condiciones meteorológicas adversas e, incluso, en climas extremos (ej.: en las regiones polares). Precisamente en estos ambientes, en los que la presencia humana es escasa y generalmente estacional, este instrumental presta un apoyo fundamental para poder acometer el monitoreo de procesos activos. En las regiones polares su uso ha sido validado para el estudio de la evolución del manto nival (de Pablo, 2024), o el retroceso costero por la degradación del permafrost (Wobus *et al.*, 2011). Por ello, el uso de las cámaras *time-lapse* es creciente en este tipo de estudios, si bien tiene aplicación en muchas otras investigaciones vinculadas con el medio natural. Este trabajo pretende estudiar el patrón anual de funcionamiento hidrogeomorfológico de tres arroyos de un área libre de hielo de la Antártida Marítima mediante el uso de cámaras *time-lapse*.

2. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se sitúa en la Península Byers (isla Livingston), que constituye la mayor área libre de hielo del archipiélago de las Shetland del Sur (~60 km²; Figura 1) y está integrada por rocas volcánicas, volcanoclásticas y detríticas del Jurásico y del Cretácico (areniscas, lutitas y conglomerados, fundamentalmente), además de sills, diques y otros cuerpos intrusivos igualmente del Cretácico. Su relieve está organizado en torno a una serie de plataformas escalonadas sobre las que resaltan algunos pitones volcánicos (ej.: Cerro Penca, 217 m de altitud; Chester Cone, 188 m). A los pies de dichas plataformas existen varios niveles de playas levantadas holocenas por el sur, el norte y el oeste. Por el este, Byers limita con el glaciar Rotch. El clima es de tipo polar marítimo, con una temperatura media anual de -2.8 °C a 70 m de altitud y precipitaciones de 500-800 mm/año (Bañón *et al.*, 2013). Debido principalmente a su rica biodiversidad y a la abundancia de lagos, Byers constituye la Zona Antártica Especialmente Protegida (ZAEP) nº 126. Dentro de esta península, los tres arroyos seleccionados para su monitorización están situados en las Playas del Sur. Según la clasificación de Mink *et al.* (2014) son los arroyos 1, 5 y 18. Tienen su cabecera en la plataforma más elevada que articula la península de E a W, arrancando desde altitudes de 121, 140 y 99 m respectivamente, y antes de desembocar en el mar cortan hasta seis niveles de playas levantadas con cotas de 15 a 2 m s.n.m. Siguiendo el mismo orden, la extensión de sus cuencas es de 3,23, 1,91 y 0,98 km² (Mink *et al.*, 2014).

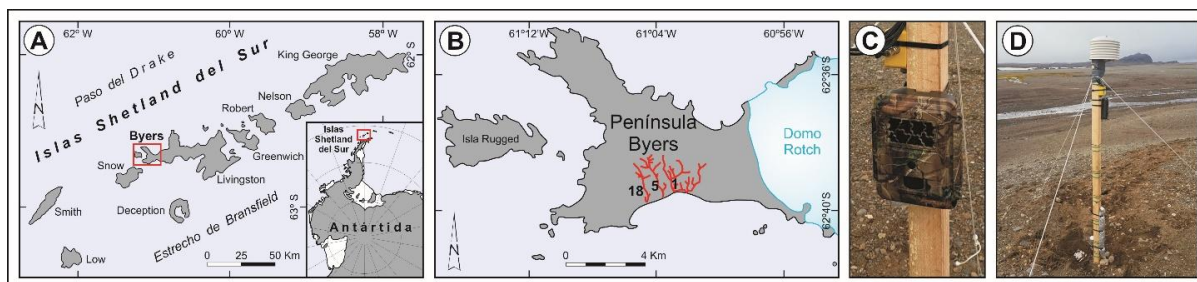


Figura 1. Mapa de localización del área de estudio (A y B), con indicación de los arroyos estudiados (1, 5 y 18). Ejemplo de la cámara instalada en el arroyo 1 (C) y vista del general del sector del cauce monitorizado (D).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

El 12 de febrero de 2023 se instalaron tres cámaras sobre otros tantos mástiles de madera, enfocadas perpendicularmente a los cauces 1, 5 y 18 en el sector más próximo al mar de los tres en los que se colocaron clastos con sensores de radiofrecuencia (por tanto, en el sector 3; ver Gómez-Pazo *et al.*, 2025; Figura 1). Los tipos de cámaras usadas inicialmente fueron SPROMISE S308 (arroyo 1, cámara A1), y Alcorn 6210 plus (arroyos 5 y 18, cámaras A5 y A18). Esta elección se basó en su rango de temperaturas para su correcto funcionamiento y en su autonomía (capacidad de 12 pilas de litio AA, frente a 9 en otros casos). A partir de febrero de 2024 todas las cámaras pasaron a ser del tipo SPROMISE S308 por su mayor sencillez de manejo. Las cámaras fueron programadas para tomar fotografías diarias a las 8, 12 y 16 horas UTC. El periodo de monitorización duró desde el 13 de febrero de 2023 al 2 de febrero de 2026. Además, las cámaras también proporcionaron los datos de temperatura tomados en consideración en este trabajo.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la campaña 2023-24 solamente funcionó durante todo el año la cámara A18. La A1 falló el 16/02/2023, y la A5 fue destruida por la fauna. En la campaña 2024-25 funcionaron la A1 y la A18. En la última campaña (2025-26) funcionaron las tres cámaras. A lo largo de los casi tres años de monitorización se han obtenido 7563 fotografías. A partir de ellas se pueden inferir cuatro fases en la evolución hidrogeomorfológica anual de los arroyos:

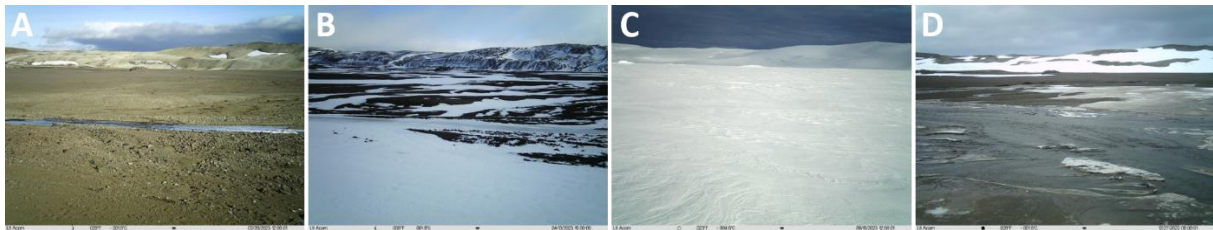


Figura 2. Imágenes de la cámara A18 (2023-24) con las cuatro fases de la evolución anual de los arroyos. A) circulación hídrica continua; B) establecimiento de la cubierta nival; C) máxima extensión nival; D) comienzo del drenaje de arroyos.

i) Circulación hídrica continua. Entre mediados/finales de diciembre e inicios de marzo (2-2,5 meses). Los arroyos reducen progresivamente el caudal tras la fase de fusión nival generalizada. Mientras aún es alto, el flujo hídrico discurre por varios brazos (de forma anastomosada). De mediados de enero a inicios/mediados de febrero los cursos tienen un caudal mínimo, concentrado en el canal principal (Figura 2A). A partir de entonces acontece un aumento del caudal en relación con días de temperaturas altas (máximas de incluso 9 a 12°C) que acrecientan la fusión del remanente de nieve en la cuenca; y también con nevadas cada vez más frecuentes, que se funden en pocas horas.

ii) Establecimiento progresivo de la nueva cubierta nival. De marzo a finales de junio o julio (4-5 meses). El flujo de los arroyos se reduce y las nevadas se intensifican paulatinamente (Figura 2B), a la par que descienden las temperaturas a nivel del aire. Primeramente, las nevadas son efímeras. La nieve caída, sin apenas espesor, se derrite en pocas horas. Sin embargo, la fusión de la nieve en días con temperaturas ligeramente superiores a 0°C no implica un aumento del caudal de los arroyos. A partir de inicios de junio se produce la implantación generalizada del manto nival por el dominio de temperaturas negativas, aunque aún con poco espesor.

iii) Máxima extensión y espesor de la cubierta nival. Entre finales de junio o julio y finales de octubre a mediados de noviembre (3-4,5 meses), coincidiendo con el periodo de máxima extensión del hielo marino, visible en la A1. La extensión del hielo marino fluctúa incluso de día a día, con retrocesos drásticos cuando la temperatura se aproxima a 0°C, y crecimiento lento pero sostenido con temperaturas negativas (de hasta -17°C el 09 y 12/08/2024). Durante esta fase el paisaje se vuelve uniforme, carente de referencias topográficas debido a que toda la superficie de las playas levantadas queda enrasada por el manto nival. Salvo excepciones muy puntuales, entre los meses de junio y septiembre las temperaturas son siempre negativas. Se alternan periodos de temporales y nevadas con otros de intensa deflación eólica. La acción del viento genera morfologías de tipo *sastrugi* debido a la abrasión generada por el bombardeo de partículas de nieve movilizadas por el viento, junto a otras morfologías como dunas (ej.: *snow waves*, *ripple marks*), pequeños pozos (*pits*) y dunas forzadas o *crag and tails* (Figura 2C; Filhol y Sturm, 2015). Según los mismos autores estas formas de erosión y de acumulación son debidas a dos tipos de movimientos de transporte básicos, la saltación y el *creep*, mientras que la suspensión tendría escasa incidencia en su formación.

iv) Inicio de la fusión nival y comienzo del drenaje de los arroyos. Entre finales de octubre y mediados a finales de diciembre (1,5-2 meses), debido a la creciente implantación de temperaturas positivas, que son dominantes a partir de diciembre. La fusión de la cubierta nival se traduce en su adelgazamiento y fragmentación gradual, dejando libres en primer lugar los afloramientos en resalte y los sectores más elevados de las playas levantadas. Progresivamente se va extendiendo al conjunto de la superficie ocupada por las terrazas marinas, salvo los ámbitos cóncavos (ej.: vertientes de los

cauces, escarpes abruptos de las playas levantadas), donde la nieve perdura más, incluso durante el verano. Las cámaras muestran cómo las escorrentías comienzan a discurrir bajo el manto nival, generando hundimientos en la superficie de la nieve de carácter lineal, al seguir la dirección del flujo hídrico. A su vez, la fusión de la nieve genera intermitentemente embolsamientos de agua en superficie que finalmente es drenada, lo cual deriva en aportes masivos de agua de forma súbita. Como ejemplo, la A18 registró el día 27/12/2023 a las 08:00 horas UTC un máximo de caudal que indica el drenaje repentino de un embolsamiento existente aguas arriba (Figura 2D). En un primer momento, el curso circula abierto con gran anchura por encima de la nieve, desbordando el canal incipiente creado en ella. Paulatinamente el flujo hídrico se va encajando en la nieve y quedando confinado, pero aún con mucho caudal. El 28/12/2023 a las 08:00 horas el arroyo ha disminuido mucho su caudal, y la nieve ha desaparecido en el sector del cauce en gran medida. Esta dinámica, con aportes masivos de agua de forma súbita, se repite los tres años en el arroyo 18. En la campaña 2023-24, la A1 ha evidenciado que la apertura del cauce entre la nieve puede variar de posición en función del drenaje de las escorrentías a través del manto nival. Una vez abierto el flujo a nivel superficial, éste va migrando dentro del lecho hacia el brazo principal. Se trata, en definitiva, de la fase que genera mayores cambios en los cauces y en la que previsiblemente se concentra el transporte como carga de fondo en estos sistemas fluviales.

5. CONCLUSIONES

El seguimiento mediante cámaras *time-lapse* ha permitido caracterizar por primera vez el ciclo hidrogeomorfológico anual de tres arroyos estacionales en la Península Byers. Se identifican cuatro fases sucesivas: i) circulación hídrica continua, ii) establecimiento progresivo de la cubierta nival hasta dar lugar al cese de la circulación hídrica, iii) máxima extensión del manto nival, y iv) inicio de su fusión, que desencadena nuevamente el flujo de los arroyos. La estacionalidad de los arroyos queda confirmada, con cese del caudal durante los meses más fríos. El instrumental ha demostrado una notable autonomía desde el punto de vista energético y una gran resistencia a las adversas condiciones climáticas antárticas. Tales ventajas, unidas a su bajo coste, avalan el uso de cámaras *time-lapse* como herramienta eficaz para la monitorización remota de procesos geomorfológicos en ambientes polares.

Agradecimientos

Proyectos PID2020-115269GB-I00 y CTM2016-77878-P. PERMATHERMAL 2021/00381, 2022/00102, 2023/00117, 2024/00041. Grupo de Invest. GEAFROST (Univ. de Oviedo, GR-2024-0012).

Referencias

- Bañón, M., Justel, A., Velázquez, D., & Quesada, A. (2013). Regional weather survey on Byers Peninsula, Livingston Island, South Shetland Islands, Antarctica. *Antarctic Science*, 25(2), 146-156.
- De Pablo, M.Á. (2024). Timelapse images datasets (2017–2022) from Livingston and Deception Islands, Antarctica, to study snow cover and weather conditions at the PERMATHERMAL monitoring network. *Data in Brief*, 52, 109970.
- Eltner, A., Kaiser, A., Abellan, A., & Schindewolf, M. (2017). Time lapse structure-from-motion photogrammetry for continuous geomorphic monitoring. *ESPL*, 42 (14), 2240-2253.
- Filhol, S., & Sturm, M. (2015). Snow bedforms: A review, new data, and a formation model. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 120(9), 1645-1669.
- Gómez-Pazo, A., Ruiz-Fernández, J., de Pablo, M.A., Menéndez-Duarte, R., Santos-González, J., Fernández-Fernández, A., Ferri-Hidalgo, L., Vázquez-Tarrío, D., Van den Bergh, M., & Berenguer-Sempere, F. (2025). Evaluación preliminar del uso de sensores RFID para el seguimiento del transporte de clastos en arroyos de la Península Byers (Antártida Marítima).

In Avances de la Geomorfología española en 2023-2025 (pp. 153-156). CeCodet – Ed. Trabe – S.E.G.

Mink, S., López-Martínez, J., Maestro, A., Garrote, J., Ortega, J. A., Serrano, E., Durán, J.J., & Schmid, T. (2014). Insights into deglaciation of the largest ice-free area in the South Shetland Islands (Antarctica) from quantitative analysis of the drainage system. *Geomorphology*, 225, 4-24.

Wobus, C., Anderson, R., Overeem, I., Matell, N., & Urban, F. (2011). Thermal erosion of a permafrost coastline: improving process-based models using time-lapse photography. *AAAR*, 43(3), 474-484.

Capítulo IV - Instabilidade de vertentes e erosão de solos

Modelagem preditiva da suscetibilidade à erosão por ravinamento no norte do Paraná (Brasil), baseada no método do Valor Informativo

Predictive Modelling of Susceptibility to Gully Erosion in Northern Paraná (Brazil) Based on the Information Value Method

G. Cruz^{1*}, S. Pereira², H. Silveira¹

¹ Universidade Estadual de Maringá, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Av. Colombo, 5790, Maringá - PR, Brasil

² Universidade do Porto, Departamento de Geografia, CEGOT, Via Panorâmica ao Campo Alegre, s/n, Porto; Universidade de Lisboa, IGOT, CEG.

*gusttavohnq@gmail.com

RESUMO

A erosão do solo constitui uma das principais problemáticas ambientais no norte do Paraná, intensificada pelo uso agrícola, da pastorícia e da cana-de-açúcar e pelas características edáficas e geomorfológicas da região. Neste estudo, aplicou-se o Método do Valor Informativo para modelar a suscetibilidade ao ravinamento, com base em variáveis ambientais e em um inventário multitemporal de ocorrências, abrangendo os anos de 2012, 2016, 2018, 2021 e 2023, totalizando 654 ravinas nas bacias hidrográficas dos córregos Água da Baiana e Santa Rita. Os resultados evidenciam que as classes de suscetibilidade moderada e elevada incluem 28,9% da área de estudo, concentrando-se nos setores médio e inferior das vertentes, em área composta por solos derivados da Formação Arenítica Goio Erê e com maior concentração de fluxo hídrico. O modelo foi validado de forma independente com o inventário de 2023, apresentando bom desempenho preditivo (AAC > 80%) e demonstrando sua eficácia como ferramenta de apoio ao planejamento ambiental.

Palavras-chave: ravinamentos, estatística bivariada, erosão do solo; Paraná.

Keywords: Rill and gully erosion, bivariate statistics, soil erosion, Paraná.

1. INTRODUÇÃO

No norte do Paraná, a intensificação histórica do uso agrícola, iniciada em meados da década de 1940, tem intensificado os processos erosivos, particularmente em áreas sob domínio de arenitos, onde a menor coesão dos solos, associada a outros fatores preditores, como as características geomorfológicas que controlam os fluxos hídricos, favorece a instabilidade superficial (Bigarella e Mazuchowski, 1985; Nóbrega et al., 2023).

Nesse contexto, a avaliação da suscetibilidade a processos geomorfológicos configura-se como uma ferramenta fundamental para subsidiar o planejamento do uso e da ocupação da terra e a gestão ambiental. Entre as abordagens disponíveis, destacam-se os métodos estatísticos bivariados, como o Método do Valor Informativo, que tem sido aplicado à modelagem de suscetibilidade à erosão linear, incluindo ravinas (Azedou et al., 2021; Fagbohun et al., 2024).

O Método do Valor Informativo avalia a contribuição de cada classe de fatores condicionantes para a ocorrência de um determinado processo (Yin e Yan, 1988), tendo por base a probabilidade condicionada e a probabilidade *a priori* de encontrar uma área ravinada nas classes das variáveis independentes e na área de estudo, respetivamente. Baseia-se no cálculo de pesos derivados da distribuição espacial de eventos

geomorfológicos, permitindo interpretar diretamente a influência de variáveis ambientais independentes, a partir da densidade do processo geomorfológico em cada classe (Aleotti e Chowdhury, 1999).

O presente estudo tem como objetivo avaliar a suscetibilidade à erosão do solo em forma de ravinas em duas sub-bacias no Paraná (Brasil) por meio da aplicação do Método do Valor Informativo, integrando um conjunto de variáveis ambientais e um inventário de ravinas referentes aos anos de 2012, 2016, 2018 e 2021. Adicionalmente, busca-se avaliar o desempenho preditivo do modelo por meio de validação independente, utilizando o inventário de ravinas de 2023, para calcular a Área Abaixo da Curva de Sucesso e de Predição.

2. ÁREA DE ESTUDO

Localizada no norte do estado do Paraná, no sul do Brasil, no domínio da bacia hidrográfica do rio Pirapó, a área de estudo compreende as bacias dos córregos Água da Baiana e Santa Rita, totalizando aproximadamente 102 km² (Figura 1). A região apresenta significativa diversidade geológica, com a ocorrência de litologias associadas a arenitos (Grupo Caiuá) e basaltos (Grupo Serra Geral), o que condiciona a variabilidade do relevo e dos solos.

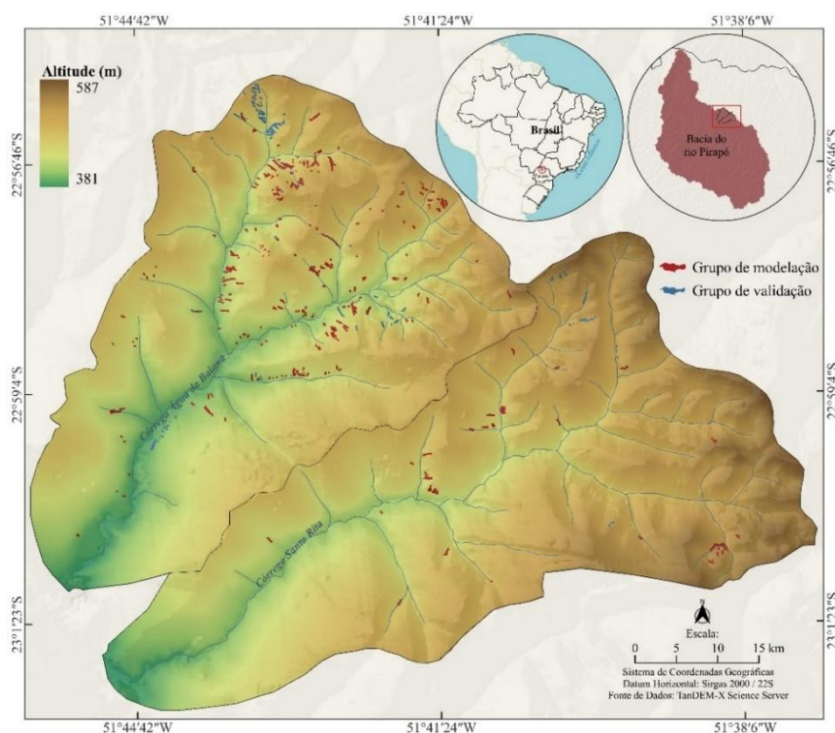


Figura 1. Localização das bacias hidrográficas dos córregos Santa Rita e Água da Baiana, com representação da distribuição espacial das ravinas do grupo de modelação e do grupo de validação

No alto compartimento da bacia, predominam materiais areníticos, associados a Argissolos (*Ultisols*) e a maiores declividades, com vertentes mais curtas e maior grau de dissecação do relevo. Em contraste, os compartimentos médios e baixos da bacia são dominados por basaltos, com a presença de Latossolos e Nitossolos, de textura argilosa e bem estruturados, além de vertentes mais longas e de menor dissecação. Essa diferenciação físico-natural reflete-se diretamente na dinâmica geomorfológica e nos processos erosivos atuantes na área. A pastagem é a principal forma de uso da terra, cobrindo cerca de 48% da área.

3. METODOLOGIA

O inventário de ravinas foi elaborado por meio de fotointerpretação e vetorização manual em formato poligonal, delimitando o perímetro externo das feições a partir de imagens de alta resolução (2 m) do Google Earth Pro, abrangendo os anos de 2012 (73), 2016 (278), 2018 (39), 2021 (24) e 2023 (240),

totalizando 654 ocorrências. As feições delimitadas possuem dimensões típicas representadas por uma área média de 153 m² (mediana de 57 m²; amplitude de 6 a 4.188 m²). A identificação baseou-se em critérios morfológicos e hidrológicos, como incisões lineares bem definidas. Os inventários de 2012, 2016, 2018 e 2021 foram utilizados na modelação, enquanto o de 2023 foi utilizado na validação independente do modelo.

Para fins de modelagem, foram consideradas 11 variáveis independentes preditoras, incluindo uso da terra — obtido via classificação supervisionada de imagens do *Google Earth Pro* de 2023 e representativo do padrão histórico estável da região, cujas oscilações temporais restringem-se à rotação e ao manejo de culturas semiperenes (e.g., cana-de-açúcar) —, geologia (Besser et al., 2021), classes de solos (Embrapa, 2008), e variáveis derivadas do Modelo Digital de Elevação (MDE), disponibilizado pela *TanDEM-X Science Server*. O MDE, gerado a partir de dados de 2011 e originalmente com resolução espacial de 12 m, foi submetido a processamento para remoção de elementos de vegetação e áreas construídas, por meio da geração de uma nuvem de pontos por pixel, seguida de filtragem e interpolação via rede triangular irregular (TIN), resultando em um modelo final com resolução espacial de 15 m. A partir desse modelo, foram obtidas as variáveis morfométricas e morfológicas do terreno (declividade, fator LS, curvaturas do plano e do perfil, exposição de vertentes e formas de relevo), assim como variáveis hidrológicas (fluxo acumulado, índice topográfico de umidade (TWI – *Topographic Wetness Index*) e índice de potência de escoamento (SPI – *Stream Power Index*), todas padronizadas na resolução espacial de 15 m.

O Valor Informativo (VI) de cada classe de cada variável e o VI final foram calculados com base nas equações de Yin e Yan (1988).

A Área Abaixo da Curva (AAC) de sucesso e de predição foi calculada para avaliar a capacidade do modelo de discriminar áreas com e sem ravinas (Gorsevski et al., 2000).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise dos inventários multitemporais evidencia variação da área afetada ao longo dos anos: 10.283 m² (2012), 54.192 m² (2016), 4.867 m² (2018), 4.267 m² (2021) e 19.897 m² (2023), indicando flutuações nos fatores desencadeantes dos ravinamentos ao longo do período analisado.

Os maiores valores de VI concentram-se em classes associadas ao fluxo acumulado (1000–5000; VI = 2,191), ao fator LS (15–20; VI = 1,774; 20–25; VI = 1,333), às formas de relevo côncavas, como vertente côncava (VI = 1,297) e vale (VI = 1,020) e à classe de solo Argissolo (*Ultisols*) (VI = 1,140).

O mapa de VI final foi classificado com as seguintes classes: VI < -1 – muito reduzida; -1 < VI < 0 – reduzida; 0 < VI < 1 – moderada; VI > 1 – elevada); indicando baixa suscetibilidade nos valores negativos e maior propensão ao processo nos valores positivos.

Na área, predominam as classes de baixa suscetibilidade à erosão, com destaque para a classe “muito reduzida” (58,5%; 59,7 km²), seguida pela “reduzida” (12,6%; 12,9 km²), associadas a superfícies mais estáveis e menos inclinadas, e aos interflúvios. Em contrapartida, as classes moderada (11,5%; 11,6 km²) e elevada (17,4%; 17,8 km²) concentram-se ao longo da rede de drenagem e em setores mais dissecados, formando padrões lineares nas vertentes. Os resultados da AAC da taxa de sucesso e da predição (82,9% e 81,9%, respectivamente) demonstram um bom ajuste do modelo e uma boa capacidade preditiva (Figura 2).

Esses resultados evidenciam que a suscetibilidade ao ravinamento é predominantemente controlada pela concentração de fluxo e pelo aumento da energia do escoamento superficial, sobretudo em solos com gradiente textural vertical (horizonte superficial arenoso sobre horizonte subsuperficial mais argiloso), derivados de arenitos, o que favorece a infiltração diferencial e a instabilidade estrutural. Áreas com essas características têm sido apontadas como preferenciais para o desenvolvimento de voçorocas na região (Nóbrega et al., 2023).

5. CONCLUSÃO

Os resultados indicam que o Método do Valor Informativo constitui uma abordagem simples e consistente para a modelagem da suscetibilidade ao ravinamento, com bom desempenho preditivo e capacidade de discriminar áreas instáveis. A ocorrência das ravinas é fortemente condicionada por fatores geomorfológicos e pedológicos, concentrando-se em setores médio e inferior das vertentes, sobre substrato arenítico e sob elevada concentração de fluxo hídrico. Nesse contexto, o modelo se apresenta como uma ferramenta relevante para o planejamento territorial e a definição de estratégias de manejo e conservação do solo no norte do Paraná.

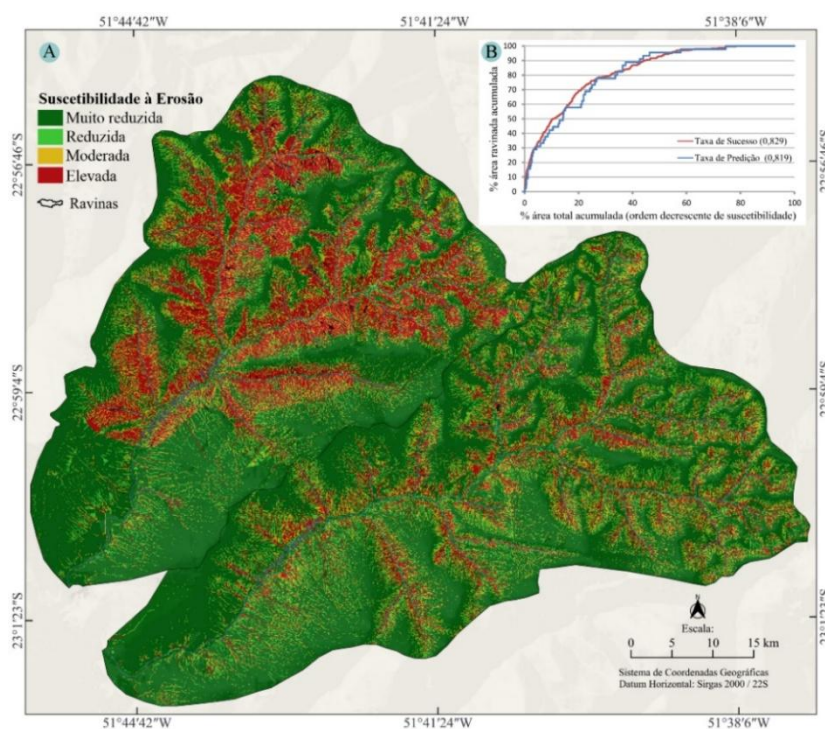


Figura 2. Suscetibilidade aos ravinamentos nas bacias hidrográficas dos córregos Santa Rita e Água da Baiana (A) e taxas de sucesso e predição do modelo (B)

Agradecimentos

O primeiro autor agradece à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro, essencial para esta pesquisa.

Referências

- Aleotti, P., & Chowdhury, R. (1999). Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 58(1), 21–44.
- Arabameri, A., Chandra Pal, S., Saha, A., Chowdhuri, I., & Lee, S. (2024). Gully erosion susceptibility mapping using machine learning models and optimization algorithms. *Catena*, 236, 107645.
- Azedou, A., Lahssini, S., Khattabi, A., Meliho, M., & Rifai, N. (2021). A methodological comparison of three models for gully erosion susceptibility mapping in the rural municipality of El Faïd (Morocco). *Sustainability*, 13(2), 682.
- Bigarella, J. J., & Mazuchowski, J. Z. (1985). Visão integrada da problemática da erosão. ABGE/ADEA.

- Fagbohun, B. J., Aladejana, O. O., Okonye, I. F., & Tobore, A. O. (2024). Assessing gully erosion susceptibility dynamics using information value and hazard index methods: A case study of Agulu-Nanka watershed, Southeast Nigeria. *CATENA*, 241, 1-13.
- Gorsevski, P. V., Gessler, P., & Foltz, R. B. (2000). Spatial prediction of landslide hazard using discriminant analysis and GIS. In *GIS in the Rockies 2000 Conference and Workshop: Applications for the 21st Century*, Denver, Colorado, September 25–27.
- Nóbrega, M. T. de, Silveira, H., Cunha, J. E. da, Beckauser, M. C., Bonifácio, C. M., & Baldo, M. C. (2023). As voçorocas no Noroeste do Paraná: locais preferenciais de ocorrência na paisagem. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 24(0), 0-25.
- Yin, K. L., & Yan, T. Z. (1988). Statistical prediction models for slope instability of metamorphosed rocks. *Proceedings of the 5th International Symposium on Landslides*, 2, 1269-1272.

Avaliação da Modelagem de Erosão Hídrica no Semiárido Paraibano Brasileiro

Evaluation of Water Erosion Modeling in the Semi-Arid Region of Paraíba, Brazil

E. Teixeira^{1*}, S. Pereira², R. Xavier³, I. Neto⁴, F. Alexandre⁵, B. Vieira¹

¹ Universidade de São Paulo, Programa de Pós-Graduação em Geografia Física (PPGF-USP)

² Universidade do Porto, Departamento de Geografia, CEGOT; Universidade de Lisboa, IGOT, CEG.

³ Universidade Estadual da Paraíba, Departamento de Geografia (DG/CEDUC-PPGDR-UEPB)

⁴ Universidade Federal do Paraná, Departamento de Geografia (PPGGeo-UFPR)

⁵ Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Geografia (PPGeo-UFPE)

* elaineteixeira@usp.br

RESUMO

Em regiões semiáridas, a erosão hídrica é intensificada por eventos extremos de precipitação. Este estudo avaliou os processos de erosão-deposição no alto curso do rio Paraíba (PB) utilizando o modelo SIMWE. Um Modelo Digital do Terreno (MDT) com resolução de 2 m foi gerado a partir de dados obtidos por VANT e interpolados por Krigagem. Os valores máximos de erosão-deposição atingiram 654,33 kg²/m². A validação com ravinas mapeadas em 2025 apresentou uma AAC de 79,6%, indicando desempenho satisfatório do modelo.

Palavras-chave: SIMWE; Modelagem Hidrológica; Semiárido Brasileiro.

Keywords: SIMWE; Hydrological Modeling; Brazilian Semi-arid Region.

1. INTRODUÇÃO

A erosão hídrica é um processo fundamental na evolução das paisagens e um dos principais agentes de degradação dos solos à escala global, com perdas expressivas de solo fértil, impactos diretos na segurança alimentar e alterações climáticas (Caldas et al., 2019; FAO, 2025). No semiárido brasileiro, esse processo é intensificado pelo aumento da ocorrência de eventos extremos de precipitação, favorecendo o escoamento superficial em áreas com baixa cobertura vegetal e o desenvolvimento de feições erosivas, como sulcos, ravinas e voçorocas (Barbosa Neto et al., 2020; IPCC, 2022; Marengo et al., 2017).

Nesse contexto, a modelagem hidrossedimentológica baseada em processos físicos, como o SIMWE, destaca-se como ferramenta essencial para compreender e prever a dinâmica erosiva, sendo a resolução do Modelo Digital do Terreno (MDT) um fator determinante para a precisão das simulações (Mitas e Mitasova, 1998; Cavazzi et al., 2013). O presente estudo teve como objetivo avaliar a dinâmica dos processos de erosão-deposição numa bacia hidrográfica do semiárido paraibano.

2. MÉTODOS

O SIMWE é um modelo de base física implementado no software GRASS GIS que permite estimar as taxas de erosão, sedimentação, transporte e deposição por escoamento superficial, bem como a distribuição espacial e temporal da perda de solo e da deposição em vertentes (Mitasova et al.,

1997; Mitas; Mitasova, 1998). Inclui o cálculo de dois módulos principais para gerar o seu produto final: o *r.sim.water* que simula o fluxo hidrológico superficial e o *r.sim.sediment* que calcula o transporte de sedimentos na drenagem.

O levantamento aerofotogramétrico foi realizado por meio de um VANT em 01/07/2025. O processamento das imagens foi conduzido no software Agisoft Metashape, resultando na geração de um Modelo Digital de Superfície (MDS) com resolução espacial de 13 cm. Contudo, em função da elevada densidade de vegetação em determinados setores da bacia, optou-se por gerar uma nuvem de pontos altimétricos para posterior filtragem manual dos pontos associados à cobertura vegetal que não foram adequadamente removidos pelos filtros automáticos do software. Após essa etapa, aplicou-se a krigagem como método geoestatístico de interpolação espacial, permitindo a obtenção de um MDT com resolução de 2 m.

O parâmetro excesso de precipitação (mm/h) foi estimado a partir de um evento extremo registado em 03/04/2008, na estação meteorológica de São Domingos do Cariri, monitorada pela Agência Executiva de Gestão das Águas. Nesse evento, foram acumulados 189,2 mm em 3,5 horas, resultando em uma intensidade média de 53,3 mm/h. A partir desse valor, subtraiu-se a taxa de infiltração obtida em ensaios de campo realizados em perfis de solo previamente caracterizados por Xavier et al., 2023

As taxas de infiltração foram calculadas em campo e diferenciadas conforme duas unidades de relevo: encostas e depósitos. As áreas de depósitos foram inicialmente definidas por declividades entre 0 e 2°. No entanto, essa faixa também incluía topos de vertentes; assim, utilizou-se o módulo Geomorphons no GRASS GIS para excluir essas áreas associadas aos interflúvios. Para os depósitos, foi atribuída uma taxa de infiltração de 0,65 mm/h. Já as encostas foram delimitadas por declividades superiores a 2°, sendo atribuída uma taxa de infiltração de 0,78 mm/h.

Em seguida, realizou-se a classificação supervisionada do ortomosaico no ArcGIS Pro, considerando três classes de uso e cobertura da terra: solo exposto, vegetação arbustiva e vegetação arbórea. A cada classe foram atribuídos valores conforme Morgan (2005) (0,01; 0,15; 0,20, respetivamente). A classificação foi refinada por meio de técnicas baseadas em árvores de decisão (*random trees*). A validação foi realizada com 14 pontos amostrais de campo, utilizando o algoritmo *Random Forest*, resultando em acurácia global de 0,92 e índice Kappa de 0,86, indicando excelente concordância entre a classificação e os dados de referência, segundo Landis e Koch (1977). Os parâmetros relacionados ao fluxo de sedimentos foram definidos com base nas recomendações do manual do Water Erosion Prediction Project (WEPP). Por fim, a fotointerpretação do ortomosaico possibilitou a elaboração de um inventário de feições erosivas, cuja validação foi conduzida por meio da taxa de predição, com base na análise da AAC.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram mapeadas 1072 feições erosivas lineares, tipo sulcos, ravinas e voçorocas na bacia do Cachoeirinha. Os processos hidrológicos e hidrossedimentológicos são preferencialmente controlados pela topografia e convergência do fluxo superficial na bacia (Figura 1). A profundidade máxima do fluxo de água (Fig. 1a) foi de 0,409 m, sendo possível identificar redes de drenagem efêmeras que são contributos para o fluxo de água do canal principal. A descarga da água (Fig. 1b) refletiu significativa heterogeneidade na distribuição do escoamento, com o valor máximo de 1,44 m³/s indicando caminhos preferenciais de fluxo e maior conectividade hidrológica (Siefert e Santos, 2012). A variação entre a profundidade do fluxo e a descarga de água é um indicativo de transição entre os regimes de escoamento difuso e concentrado, elemento crucial para a iniciação de processos erosivos.

Esse padrão também foi observado por Fernandes (2017), ou seja, maiores valores de fluxo de água estão associados ao desenvolvimento de feições erosivas lineares, especialmente em zonas de convergência topográfica.

A capacidade de transporte representa a possibilidade dos sedimentos serem deslocados pelo fluxo da água, estando diretamente relacionada às propriedades do solo e à influência da vegetação (Warren, 1998). Variando de 0 a 359,4 kg/m.s, a capacidade de transporte (Fig. 1c) evidencia que nem todos os setores da rede de drenagem principal dispõem de energia suficiente para mobilizar sedimentos. A concentração de sedimentos (Fig. 1d), com valores de 0 a 25.081 partículas/m², indica que o transporte sedimentar ocorre de forma pontual na bacia. O fluxo de sedimentos (Fig. 1e) variando entre 0 e 44,51 kg/m.s, confirma a presença de setores com transporte ativo de material. As dinâmicas dos processos erosivos estão articuladas à energia do fluxo superficial, assim, o SIMWE tende a concentrar os maiores fluxos e as maiores taxas de transporte em áreas pontuais da bacia (Mitas e Mitasova, 1998).

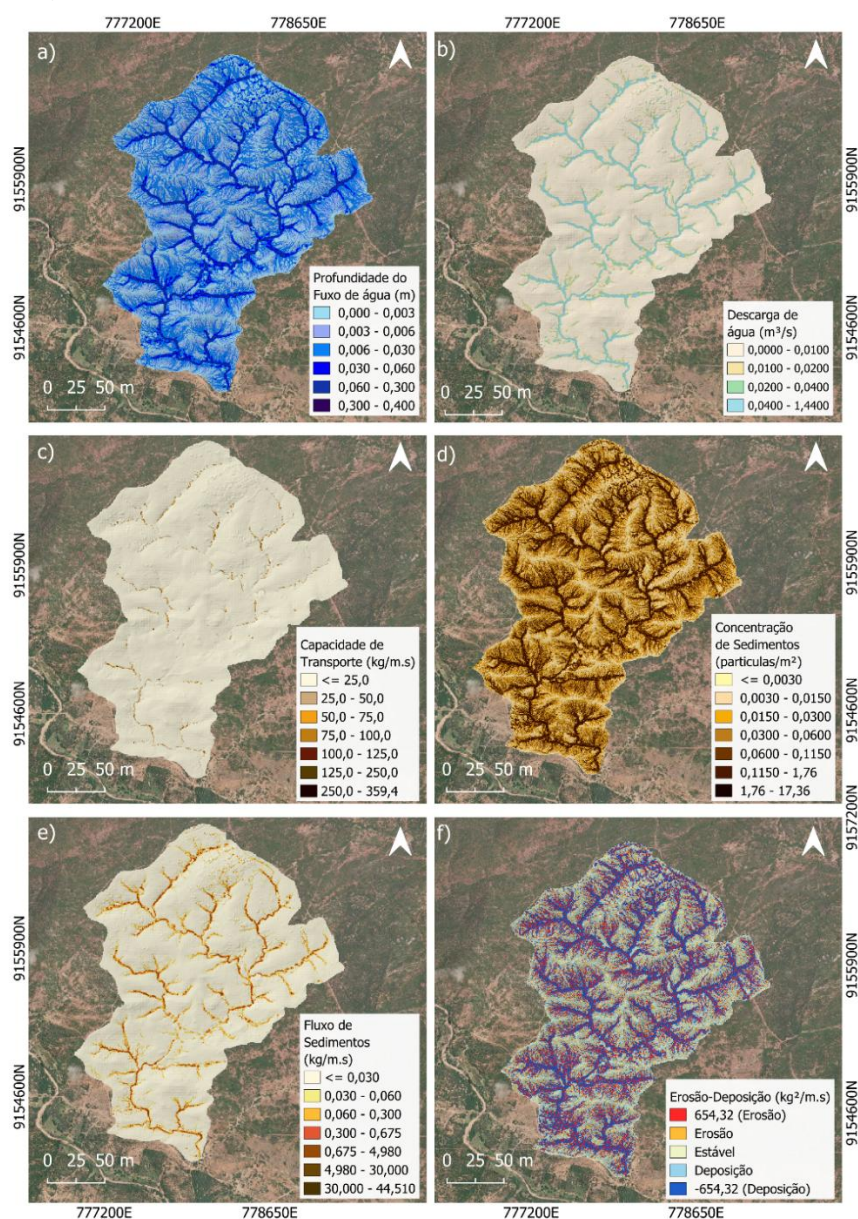


Figura 1. (a) Profundidade do Fluxo da água; (b) Descarga de água; (c) Capacidade de Transporte; (d) Concentração de Sedimentos; (e) Fluxo de Sedimentos; (f) Erosão-Deposição.

Os valores máximos de erosão ($654,33 \text{ kg}^2/\text{m.s}$) foram considerados elevados, o que coincide com os valores extremos observados em áreas de convergência do fluxo superficial. A sobreposição do inventário de feições erosivas e o mapa de erosão do modelo resultou em uma AAC da taxa de predição de 79,6% indicando confiabilidade entre os resultados simulados e as evidências empíricas de erosão.

4. CONCLUSÕES

O SIMWE foi desenvolvido para trabalhar com MDTs de alta resolução. Neste estudo, o aerolevantamento realizado com o VANT para a área de estudo gerou um MDS com significativa influência da vegetação, sendo necessária uma limpeza manual da nuvem de pontos nas áreas críticas com elevada densidade da vegetação e posterior krigagem para a interpolação espacial do MDT de 2m de resolução.

Diante do exposto, os métodos de processamento adotados para avaliar a dinâmica de erosão-deposição na bacia do Cachoeirinha foram considerados satisfatórios. No entanto, salienta-se que as aplicações de modelos matemáticos de base física têm limitações devido à disponibilidade de dados. Ademais, a pesquisa quantifica as taxas de erosão-deposição para o semiárido paraibano, validando o modelo por meio de procedimentos estatísticos. A rotina de trabalho adotada e os resultados apresentados poderão contribuir para discussões acerca de métodos eficazes para quantificação das taxas de erosão em regiões semiáridas.

Referências

- AESA (2026). Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba. <https://www.aesa.pb.gov.br>
- Barbosa Neto, M. V., Araújo, M. S. B., Araújo Filho, J. C., Sampaio, E. V. DE S., Almeida, B. G. (2021). Rill and sheet soil erosion estimation in an area undergoing desertification in the Brazilian semi-arid region. *Modeling Earth Systems and Environment*, v. 7, p. 1183–1191. <https://doi.org/10.1007/s40808-020-01026-y>
- Caldas, V. I. S. P., Silva, A. S., Santos, J. P. C. Suscetibilidade à erosão dos solos da bacia hidrográfica Lagos–São João (2019). *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 12, p. 1415–1430.
- Cavazzi, S., Corstanje, R., Mayr, R., Hannam, J. Fealt, R. (2013). Are high resolution DEMs always the best choice in digital soil mapping? *Geoderma*, v. 195-196, p.111-121. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.11.020>
- Fernandes, J., Bateira, C., Soares, L., Faria, A., Hermenegildo, C., Moura, R., Gonçalves, J (2017). SIMWE model application on susceptibility analysis to bank gully erosion on Alto Douro Wine Region agricultural terraces. *Catena* 153 (2017) 39–49. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2017.01.034> 0341-8162/© 2017 Elsevier B.V. All rights reserved.
- IPCC (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge.
- Landis, J. R.; Koch, G. G (1977). The measurement of observer agreement. *Biometrics*, v. 33, p. 363–374. <https://doi.org/10.2307/2529786>
- Marengo, J. A., Torres, R.R., Alves, L. M (2017). Drought in Northeast Brazil-past, present and future. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 129, p. 1189–1200.
- Mitas, L., Mitasova, H. (1998). Distributed soil erosion simulation for effective erosion prevention. *Water Resources Research*, v. 34, n. 3, p. 505–516, 1998.

- Mitasova, H., Brown, W. M., Johnston, D., Mitas, L. Gis. (1997). Tools for erosion/deposition modeling and multidimensional visualization. University of Illinois, p.33.
- Morgan, R. P. C. (2005). Soil Erosion and Conservation (3rd ed.). Oxford: Blackwell Publishing Ltd.
- Siefert, C. A; Santos, I. (2012). Mecanismos de geração de escoamento e áreas hidrologicamente sensíveis. *Ra'e Ga – O Espaço Geográfico em Análise*, v. 24, 2012. DOI: 10.5380/raega.v24i0.26216.
- Warren, S. D (1998). Validation of models of soil erosion and runoff. *Environmental Modelling e Software*, v.13, n. 3-4, p. 301-309.
- Xavier, R. A., Borges Neto, I. O., Souza, J. J. L. L., Cardoso, P. V., Souza, J. O., Souza, B. I (2023). Processos de voçorocamento no Planalto da Borborema, semiárido da Paraíba. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 24, e2359.

Parametrização Física da Erodibilidade no Modelo SIMWE para Superfícies Lateríticas de Cimeira

Physical Parameterization of Erodibility in the SIMWE Model for Lateritic Summit Surfaces

B. Tavares¹*, F. Villela¹, S. Pereira², P. Vidal Torrado¹

¹ Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.

² Centro de Estudos em Geografia e Ordenamento do Território, Faculdade de Letras da Universidade do Porto; Via Panorâmica, s/n, 4150-564 Porto.

*beatriz.marina@usp.br

RESUMO

Apesar da vasta extensão das superfícies lateríticas no Cerrado brasileiro, há uma expressiva escassez de estudos voltados à simulação hidrossedimentológica nesses ambientes. Algoritmos estruturados para solos sem couraças exigem adaptações metodológicas para representar a resistência mecânica de materiais endurecidos. Neste contexto, o objetivo deste trabalho é avaliar a morfodinâmica erosivo-deposicional atual na Serra do Lajeado (TO), a partir da calibração física da Tensão Crítica de Cisalhamento e do Coeficiente de Desprendimento. A estimativa da resistência da couraça, aplicada no modelo SIMWE, indicou uma força de fluxo limitante de 9,04 Pa e uma taxa de desprendimento calibrada em 0,0077 kg/N.s, valores que refletem o elevado atrito dos solos concrecionários. Ao aplicar esses limiares, o modelo caracterizou corretamente a expressiva estabilidade morfodinâmica nos topos de *Petroplinthic Plinthosols*, demonstrando que a macrorrugosidade inibe o destacamento hídrico na cimeira. A dissecação severa (picos de até 2.173 kg/m².s) restringiu-se aos talwegues e zonas de incisão, atestando que o rigor na parametrização da resistência dos solos encouraçados é uma adaptação imprescindível para gerar previsões hidrossedimentológicas compatíveis com a dinâmica da paisagem.

Palavras-chave: Modelagem Hidrossedimentológica; *Petroplinthic Plinthosols*; Erosão Hídrica.

Keywords: Hydrosedimentological Modeling; *Petroplinthic Plinthosols*; Water Erosion

1. INTRODUÇÃO

Os materiais pedológicos lateríticos, classificados maioritariamente como *Petroplinthic* e *Pisoplinthic Plinthosols* (IUSS Working Group WRB, 2022), apresentam elevada resistência físico-química devido ao endurecimento irreversível das plintitas (Aleva, 1994). No Cerrado tocantinense, essa expressiva dureza atua ativamente na morfogênese, preservando níveis topográficos e sustentando feições residuais, tais como chapadas e áreas de cimeira aplainadas (Brizzi et al., 2024). Na hidrodinâmica de vertentes, a macrorrugosidade e a coesão dos horizontes litoplínticos e concrecionários atuam como barreira mecânica ao trabalho erosivo do escoamento, restringindo o destacamento hídrico da matriz de terra fina (Poesen et al., 1994). Contudo, a escassez de previsões quantitativas nesses ambientes impõe desafios à modelagem física, uma vez que algoritmos como o SIMWE (*Simulated Water Erosion*) (Mitas e Mitasova, 1998) demandam parametrizações precisas para não negligenciar a complexidade hidrossedimentológica da superfície (Jetten et al., 2003). Diante dessa lacuna, este trabalho objetiva avaliar a morfodinâmica erosivo-deposicional atual na Serra do Lajeado (TO), a partir da aplicação do modelo SIMWE fisicamente calibrado quanto à Tensão Crítica de Cisalhamento e ao Coeficiente de Destacamento.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A área de estudo compreende a Sub-Bacia do Córrego Brejo da Passagem, tributário do Ribeirão Lajeado (Serra do Lajeado, Palmas-TO), cujos divisores topográficos correspondem a topos aplainados sustentados por *Petroplinthic Plinthosols* (PT-pt). Em sucessão, observam-se *Pisoplinthic Plinthosols* (PT-pp) recobrimdo as vertentes de maior declividade, enquanto, nos fundos de vale, ocorrem *Rhodic Ferralsols* (FR-ro) (Ranzani, 2002). A modelagem hidrossedimentológica foi conduzida por meio do modelo físico-matemático SIMWE (Mitas e Mitasova, 1998), sobre um Modelo Digital de Terreno (MDT) de 2 metros. Aplicou-se o método de Partição da Tensão de Cisalhamento (Foster, 1982), que assume alta dissipação de energia do fluxo ao colidir com cascalhos lateríticos (Abrahams, 1986). A tensão efetiva (τ_{input}) capaz de acessar e erodir a matriz fina intersticial é expressa pela Equação 1:

$$\tau_{input} = \tau_{cb} \cdot \left(\frac{n_{total}}{n_{solo}} \right)^{1.5} \quad [\text{Eq. 1}]$$

onde τ_{cb} é a tensão basal da matriz fina (Pa); n_{total} é a macrorugosidade da superfície detrítica; e n_{solo} é a rugosidade da matriz fina. Para a simulação considerou-se, $\tau_{cb} = 1,13$ Pa (Giasson e Cassol, 1996); $n_{total} = 0,060$ (Te Chow, 1959) e $n_{solo} = 0,015$ (USDA, 1986), resultando em $\tau_{input} = 9,04$ Pa. Todos os parâmetros utilizados no modelo SIMWE estão sintetizados no Quadro 1.

Parâmetro	Classe/Condição	Valor	Fonte
Taxa de infiltração (mm/h)	<i>Plinthosols</i>	16,7	Vilarinho et al. 2019
	<i>Rhodic Ferralsols</i>	24,012	Sousa, 2013
Precipitação (mm/h)	Valor único	57,4	INMET, 2025
Coef. de rugosidade (n)	0,40 (Cerrado Ralo); 0,80 (Cerradão e Mata de Galeria); Campo Sujo (0,24); 0,011 (Solo exposto, asfalto)		USDA, 1986
Coef. de Desprendimento ($\text{kg N}^{-1} \text{s}^{-1}$)	<i>Plinthosols</i>	0,0077	Giasson e Cassol, 1996
	<i>Rhodic Ferralsols</i>	0,00775	Martins Filho, 1994
Coef. de Capacidade de Transporte (s)	Valor único	0,01	Neteler and Mitasova, 2004
Tensão Crítica de Cisalhamento (Pa)	<i>Plinthosols</i>	9,04	Adaptado de Giasson e Cassol (1996)
	<i>Rhodic Ferralsols</i>	2,48	Martins Filho, 1994

Quadro 1. Parâmetros hidrodinâmicos de entrada do modelo SIMWE

A confiabilidade das simulações do SIMWE foi atestada pela curva de taxa de sucesso, confrontando o cenário predito com feições erosivas pré-mapeadas (Chung e Fabbri, 2003), sendo a acurácia geral mensurada pelo índice da Área Sob a Curva (AUC) (Beguiria, 2006).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise espacial e estatística da simulação calibrada evidencia a alta complexidade hidrossedimentológica da bacia (Figura 1). O modelo revela um padrão dendrítico, concentrando os processos erosivos de alta magnitude nos talvegues e nas zonas de incisão, dinâmica característica de fluxos superficiais concentrados em canais de cabeceira (Mitas e Mitasova, 1998). Essa dinâmica expressa-se na elevada amplitude dos valores extremos de erosão e deposição, com a modelagem registrando picos expressivos que oscilam entre $-3.196 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ (extremo deposicional) e $2.173 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ (extremo erosivo), comportamento comum em setores dissecados sob eventos pluviométricos de

elevada intensidade (Richardson et al., 2025). Tais extremos atestam a alta capacidade de dissecação hídrica que atua de forma concentrada após o rompimento da barreira mecânica imposta pelas petroplintitas, nas quebras de relevo das áreas de cimeira (Richardson et al., 2025).

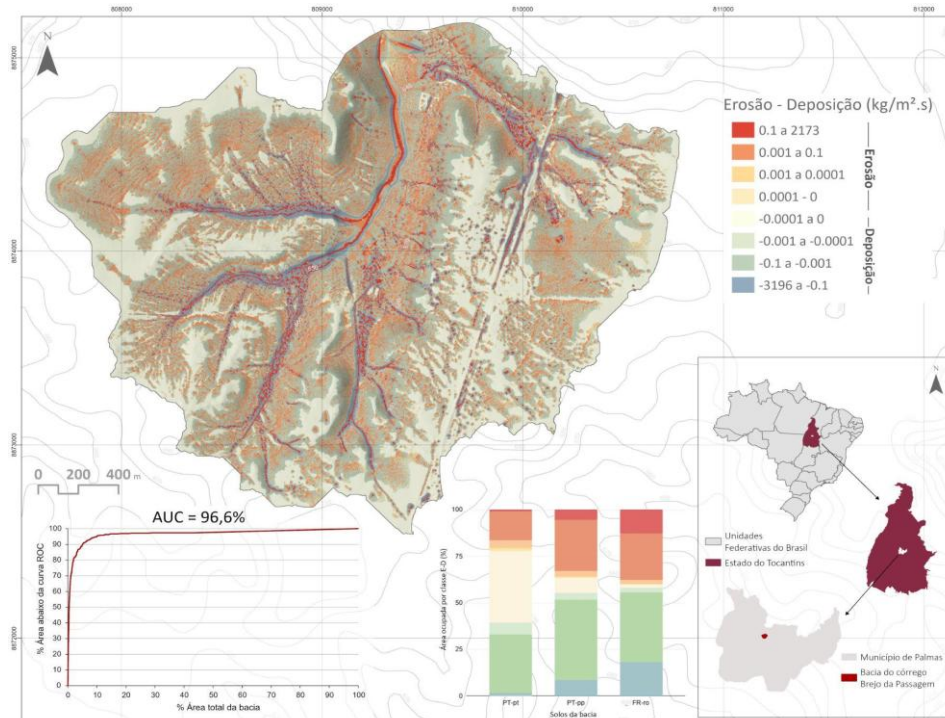


Figura 1. Morfodinâmica simulada pelo modelo SIMWE calibrado, com validação estatística (Curva ROC) e distribuição espacial das classes hidrossedimentológicas por tipo de solo. Autoria própria.

Os dados corroboram que as superfícies lateríticas condicionam ativamente a organização da rede de drenagem de 1ª e 2ª ordem, dinâmica cuja exatidão preditiva foi classificada como “quase perfeita” pela curva ROC (AUC de 96,6%). O modelo demonstrou elevada aderência na discriminação das classes de estabilidade morfodinâmica (0 a $-0,001 \text{ kg/m}^2\cdot\text{s}$), as quais são predominantes nos topos aplainados e abrangem aproximadamente 40% da área de ocorrência dos Plintossolos Litoplínticos. A análise atesta que a energia dissipada pelo escoamento laminar é insuficiente para superar o limiar de resistência das petroplintitas (9,04 Pa), inibindo o destacamento hídrico da matriz fina (Abrahams et al., 1986; Poesen et al., 1994). Configura-se, assim, um domínio limitado pelo destacamento, no qual os platôs centrais permanecem estáveis frente ao rebaixamento vertical (Foster, 1982; Giasson e Cassol, 1996). A dissecação atua preferencialmente a partir das franjas das áreas de couraças, onde a convergência de fluxo e o gradiente topográfico rompem a barreira mecânica da couraça (Mitas e Mitasova, 1998; Momo et al., 2024).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados atestam a eficácia da parametrização física na modelagem hidrossedimentológica de superfícies lateríticas. A calibração via Partição da Tensão de Cisalhamento no modelo SIMWE representou com precisão a hidrodinâmica local, garantindo que a macrorrugosidade das couraças atuasse no modelo como uma eficiente dissipadora de energia hídrica. A coerência dessa parametrização com a realidade geomorfológica foi corroborada pela alta exatidão preditiva da curva de taxa de sucesso (AUC = 96,6%). Conclui-se que o rigor no ajuste de variáveis físicas limitantes é uma adaptação imprescindível para a predição quantitativa em relevos encouraçados, assegurando a correta espacialização da estabilidade das cimeiras e da incisão concentrada nas vertentes.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), processo nº 2025/27608-6, durante Estágio de Pesquisa no Exterior na Universidade do Porto.

Referências

- Alewa, G. J. J. (1994). Laterites: Concepts, geology, morphology and chemistry. Wageningen: ISRIC.
- Abrahams, A. D., Parsons, A. J., & Luk, S. H. (1986). Resistance to overland flow on desert hillslopes. *Journal of Hydrology*, 88(3-4), 343-363.
- Beguería, S. (2006). Validation and evaluation of predictive models in hazard assessment and area prediction of landslides. *Environmental Geology*, 50(3), 315-327.
- Brizzi, R. R., Villela, F. N. J., Catarucci, A. F. M., Palma, H. P., & Vidal-Torrado, P. (2024). Recognition of duricrust geomorphic surfaces using a relief dissection matrix. *Mercator*, 23, 1-13.
- Chung, C. J. F., & Fabbri, A. G. (2003). Validation of spatial prediction models for landslide hazard mapping. *Natural Hazards*, 30(3), 451-472.
- Giasson, E., & Cassol, E. A. (1996). Relações da erosão em sulcos com vazões aplicadas e doses de resíduos de trigo incorporados a um Plintossolo franco-argilo arenoso. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 20, 117-125.
- Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). (2025). Banco de Dados Meteorológicos (BDMEP). Dados de Estações Meteorológicas. INMET.
- IUSS Working Group WRB. (2022). World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th edition. International Union of Soil Sciences (IUSS), Vienna.
- Jetten, V., Govers, G., & Hessel, R. (2003). Erosion models: quality of spatial predictions. *Hydrological Processes*, 17(5), 887-900.
- Martins Filho, M. V. (1994). Erodibilidade inter e intra-sulcos dum Latossolo Vermelho-Escuro textura argilosa da região de Jaboticabal-SP [Tese de doutorado, Universidade de São Paulo].
- Mitas, L., & Mitášová, H. (1998). Distributed soil erosion simulation for effective erosion prevention. *Water Resources Research*, 34(3), 505-516.
- Momo, M. N., Ntchantcho, R., Beauvais, A., & Tematio, P. (2024). Lateritic landsurface-regolith differentiation on Pan-African granitic terrain. *Catena*, 242, 108103.
- Ranzani, G. (2002). Solos e aptidão agrícola das terras do município de Palmas-Tocantins. Fundação Universidade do Tocantins.
- Richardson, J. C., Vanacker, V., Hodgson, D. M., Christl, M., & Lang, A. (2025). Constraining the timing and processes of pediment formation and dissection: implications for long-term evolution in the Western Cape, South Africa. *Earth Surface Dynamics*, 13(2), 315-339.
- Sousa, F. A. D. (2013). A contribuição dos solos originados sobre granitos e rochas alcalinas na condutividade hidráulica, na recarga do lençol freático e na suscetibilidade erosiva: um estudo de caso na alta bacia hidrográfica do Rio dos Bois em Iporá-GO [Tese ou Dissertação não especificada].
- Te Chow, V. (1959). Open channel hydraulics.
- USDA. (1986). Urban hydrology for small watersheds. Technical Release 55 (TR-55). Natural Resources Conservation Service.
- Vilarinho, M. K. C., Nascimento, J. C., Silva, T. J. A., Isquierdo, E. P., Caldeira, D. A. S., & Oliveira, C. P. (2019). Velocidade de infiltração básica de um Plintossolo Pétrico situado em áreas de pastagem e cerrado. *Rev Bras Agric Irrig*, 7, 17-26.

Análise comparativa de limiares de precipitação simples e combinados para deteção de movimentos de vertente na ilha de São Miguel (Açores, Portugal)

Comparative Analysis of Simple and Combined Rainfall Thresholds for the Detection of Landslides on São Miguel Island (Azores, Portugal)

R. F. Silva^{1,2*}, R. Marques^{1,2}, J. L. Zêzere^{3,4}

¹ Instituto de Investigação em Vulcanologia e Avaliação de Riscos (IVAR), Universidade dos Açores.

² Centro de Informação e Vigilância Sismovulcânica dos Açores (CIVISA), Universidade dos Açores.

³ Centro de Estudos Geográficos, IGOT, Universidade de Lisboa.

⁴ Laboratório Associado TERRA, Instituto Superior de Agronomia, Universidade de Lisboa.

*Rui.FF.Silva@azores.gov.pt

RESUMO

Os movimentos de vertente, frequentemente desencadeados por precipitação intensa ou prolongada, representam um risco significativo na ilha de São Miguel (Açores). Este estudo define limiares de precipitação com base em 61 eventos de instabilidade e em dados diários de quatro estações meteorológicas (1977–2020), propondo uma abordagem combinada que integra limiares preparatórios e de desencadeamento. Os limiares foram definidos com recurso à distribuição GEV (*Generalized Extreme Values*) e validados através de métricas ROC (*Receiver Operating Characteristic*). Os resultados demonstram que os limiares combinados, em comparação com os limiares simples, melhoram a capacidade de deteção e reduzem os falsos positivos, evidenciando o seu potencial para aplicação em sistemas de alerta.

Palavras-chave: *Movimentos de vertente, Limiar combinado de precipitação, Ilha de São Miguel, Açores*

Keywords: *Landslide, Combined Rainfall Threshold, São Miguel Island, Azores*

1. INTRODUÇÃO

Os movimentos de vertente constituem um dos perigos naturais mais recorrentes, podendo provocar impactos significativos nas populações, nas infraestruturas e nas atividades económicas. Diversos estudos demonstram que a sua ocorrência está frequentemente associada a combinações específicas entre a intensidade e a duração da precipitação (e.g., Guzzetti et al., 2008).

Neste contexto, a definição de limiares de precipitação tem sido amplamente utilizada para compreender e prever a ocorrência destes fenómenos, contribuindo para o desenvolvimento de sistemas de alerta precoce e de estratégias de gestão do risco (Segoni et al., 2018).

O presente trabalho tem como objetivo definir limiares de precipitação empíricos combinados para o desencadeamento de movimentos de vertente e comparar o seu desempenho com o de limiares simples. A área de estudo corresponde à ilha de São Miguel, no arquipélago dos Açores, caracterizada por relevo acidentado, materiais de origem vulcânica e quantitativos anuais de precipitação que variam entre 835 mm e 3000 mm, fatores que favorecem a instabilidade das vertentes.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Foram utilizados 61 eventos de instabilidade geomorfológica documentados na base de dados NATHA (Marques, 2013; Silva et al., 2024), em conjunto com dados de precipitação de quatro estações meteorológicas (Sete Cidades, Ponta Delgada, Santana e Furnas) no período de 1977–2020.

Aplicou-se a distribuição GEV, parametrizada pelo método da Máxima Verossimilhança, com o objetivo de identificar, para cada evento, o par precipitação acumulada – duração ($P_{acum}-D$) com o maior período de retorno, definindo assim um limiar preparatório. O limiar de desencadeamento foi determinado através da análise da precipitação registada no dia do evento (I_{D1}), em função da duração (D) do período de precipitação preparatória. O limiar final resulta da combinação dos limiares preparatório e de desencadeamento, sendo um evento detetado quando ambos são excedidos. A validação foi realizada através de métricas ROC, permitindo avaliar o desempenho dos limiares.

Os limiares foram ainda normalizados pela Precipitação Média Anual (PMA), tendo sido determinadas as probabilidades de excedência mensais para todas as estações e para as diferentes durações consideradas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Definição dos limiares de precipitação

Os limiares preparatórios apresentam padrões semelhantes entre as estações, embora com diferenças significativas nos valores absolutos (Figura 1). As estações das Sete Cidades e Furnas, localizadas a 260 mm e 280 m de altitude, respetivamente, registam os valores mais elevados de precipitação acumulada, refletindo condições mais húmidas, enquanto Ponta Delgada e Santana, localizadas a 20 mm e 71 m de altitude, respetivamente, apresentam limiares mais baixos. Relativamente aos limiares de desencadeamento, a estação das Furnas destacou-se pelos valores mais elevados de intensidade diária de precipitação. Observa-se uma relação inversa entre a duração da precipitação acumulada e a intensidade necessária para desencadear movimentos de vertente.

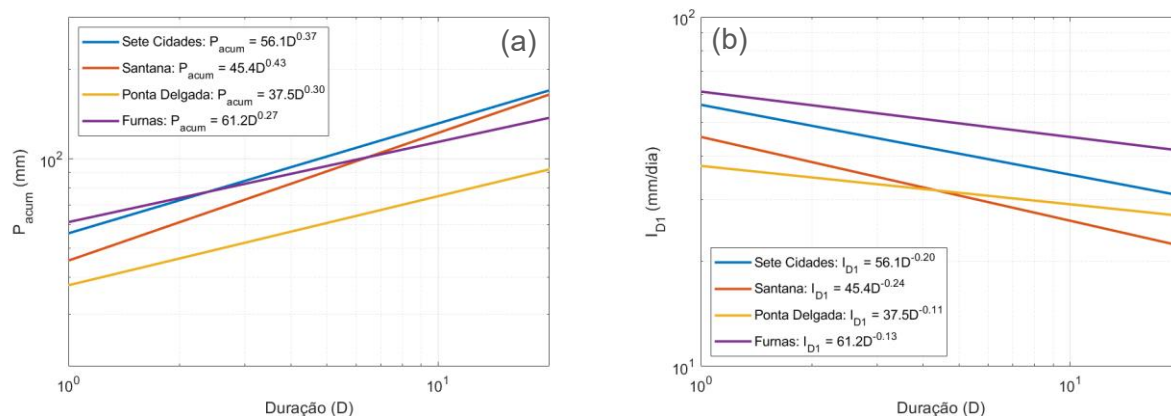


Figura 1. (a) Limiares preparatórios e (b) limiares de desencadeamento e respetivas equações para as quatro estações meteorológicas.

3.2. Validação dos limiares

A análise das métricas ROC evidencia diferenças entre os dois tipos de limiares. O limiar preparatório isolado apresenta elevada taxa de deteção, mas também um número significativo de falsos positivos, o que limita sua aplicabilidade operacional (Quadro 1). Por outro lado, o limiar combinado demonstra uma melhoria consistente do desempenho, reduzindo significativamente os falsos positivos em todas

as estações (Quadro 2). Este resultado traduz-se num aumento do índice de sucesso (TS), evidenciando maior fiabilidade na deteção de eventos.

Quadro 1. Métricas ROC associadas ao limiar preparatório para cada estação meteorológica.

Estação meteorológica	FP	VN	VP	FN	VP _{rate}	FP _{rate}	FA _{rate}	TS
Sete Cidades	943	1364	21	0	1,00	0,41	0,98	0,02
Ponta Delgada	650	603	12	0	1,00	0,52	0,98	0,02
Santana	356	970	22	0	1,00	0,27	0,94	0,06
Furnas	1451	953	41	0	1,00	0,60	0,97	0,03

Quadro 2. Métricas ROC associadas ao limiar combinado para cada estação meteorológica.

Estação meteorológica	FP	VN	VP	FN	VP _{rate}	FP _{rate}	FA _{rate}	TS
Sete Cidades	344	1963	21	0	1,00	0,15	0,94	0,06
Ponta Delgada	194	1059	12	0	1,00	0,15	0,94	0,06
Santana	198	1128	22	0	1,00	0,15	0,90	0,10
Furnas	326	2078	41	0	1,00	0,14	0,89	0,11

3.3. Normalização dos limiares pela PMA

A normalização dos limiares pela PMA permitiu reduzir a dispersão entre os limiares das diferentes estações, indicando que parte das diferenças observadas em termos absolutos está diretamente relacionada ao regime da precipitação local (Figura 2). Em particular, estações com valores acumulados anuais mais elevados, como as Furnas e Sete Cidades, passaram a apresentar limiares mais próximos dos observados em Ponta Delgada e Santana. Os resultados sugerem que os movimentos de vertente são desencadeados quando é registada cerca de 3% a 4% da precipitação média anual num dia.

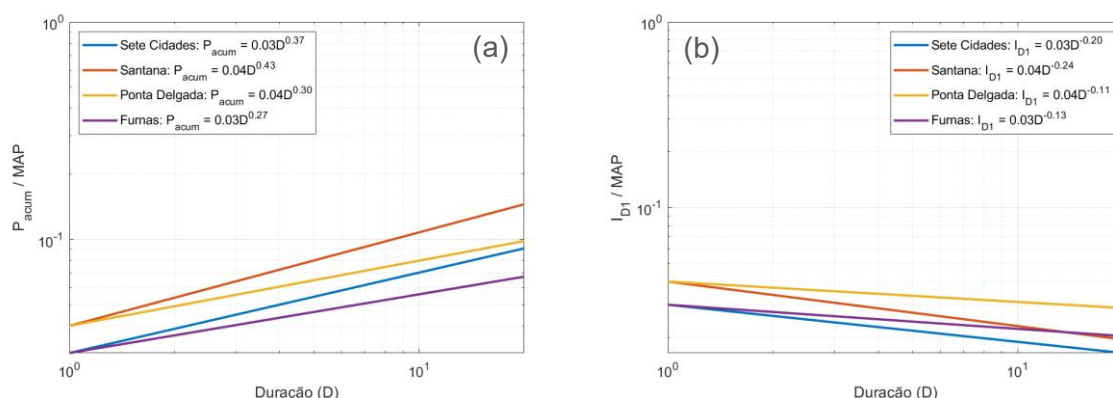


Figura 2. (a) Limiares preparatórios e (b) limiares de desencadeamento e respetivas equações, normalizados pela MAP, para as quatro estações meteorológicas.

3.4. Probabilidade de excedência mensal e período de retorno dos limiares combinados

Os resultados revelam uma clara sazonalidade na ocorrência de eventos de precipitação capazes de desencadear movimentos de vertente (Figura 3). Os meses entre dezembro e março apresentam maior probabilidade de excedência, refletindo a concentração de precipitação e as condições de saturação do solo. A maioria dos movimentos de vertente ocorre associada a eventos de precipitação de curta duração (1–3 dias). As estações com menor PMA, como Ponta Delgada e Santana, exigem eventos de precipitação mais intensos ou de maior duração para desencadear movimentos de vertente, enquanto as Furnas e Sete Cidades apresentam limiares menos exigentes, resultando em maior probabilidade de excedência e períodos de retorno inferiores a 5 anos.

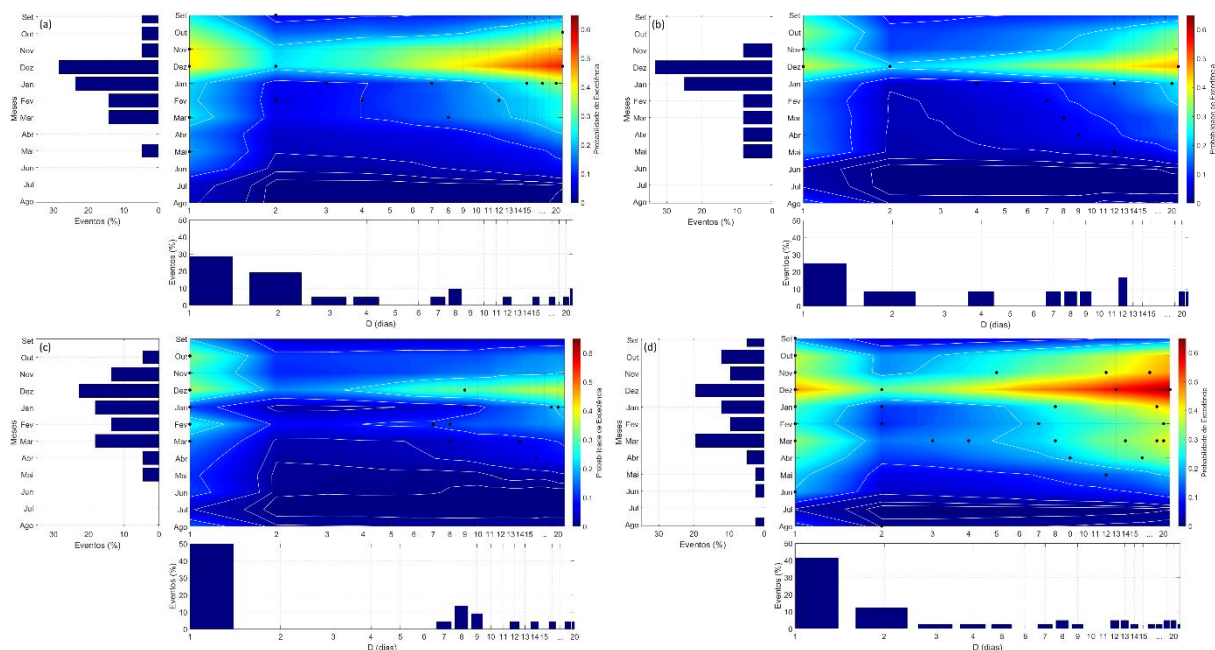


Figura 3. Probabilidade de excedência mensal do limiar combinado para a ocorrência de movimentos de vertente e respetivos períodos de retorno para: (a) Sete Cidades, (b) Ponta Delgada, (c) Santana e (d) Furnas. A figura inclui as percentagens mensais dos eventos. Os pontos pretos representam eventos.

4. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos demonstram que os limiares de precipitação combinados constituem uma ferramenta mais eficaz para a deteção de movimentos de vertente do que as abordagens baseadas num limiar simples. A integração da precipitação acumulada e da intensidade diária permite captar de forma mais completa os processos de preparação e desencadeamento, conduzindo a uma redução significativa dos falsos positivos e a uma melhoria global do desempenho. Adicionalmente, a normalização dos limiares pela PMA revelou-se uma estratégia promissora para a definição de um limiar geral para a ilha de São Miguel, tendo em conta a consistência dos limiares determinados nas diferentes estações meteorológicas.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA) e à Direção Regional do Ambiente e Ação Climática – Secretaria Regional do Ambiente e Ação Climática do Governo Regional dos Açores (DRAAC-SRAAC-GRA) pela disponibilização dos dados de precipitação utilizados neste estudo. Este trabalho foi apoiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) através da bolsa UI/BD/152207/2021.

Referências

- Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M., & Stark, C. P. (2008). The rainfall intensity–duration control of shallow landslides and debris flows: an update. *Landslides*, 5(1), 3–17. <https://doi.org/10.1007/s10346-007-0112-1>
- Marques, R. (2013). Estudo de movimentos de vertente no concelho da Povoação (ilha de São Miguel, Açores). Tese de doutoramento, Universidade dos Açores.
- Segoni, S., Piciullo, L., & Gariano, S. L. (2018). A review of recent literature on rainfall thresholds for landslide occurrence. *Landslides*, 15(8), 1483–1501. <https://doi.org/10.1007/s10346-018-0966-4>

Silva, R. F., Marques, R., & Zêzere, J. L. (2024). Spatial distribution, temporal trends and impact of landslides on São Miguel Island (1900–2020). *Natural Hazards*, 120(3), 2617–2638. <https://doi.org/10.1007/s11069-023-06296-0>

Dinâmica erosiva em diferentes cenários de precipitação: aplicação do modelo SIMWE

Erosive dynamics in different rainfall scenarios: Application of the SIMWE model

S. L. Teixeira^{1,*}, S. Pereira^{2,3}, C. Bateira⁴

¹ Faculdade de Letras da Universidade do Porto; Via Panorâmica, s/n, 4150-564 Porto; steixeira@letras.up.pt

² Centro de Estudos em Geografia e Ordenamento do Território, Faculdade de Letras da Universidade do Porto; Via Panorâmica, s/n, 4150-564 Porto; sspereira@letras.up.pt

³ Centro de Estudos Geográficos, IGOT, Universidade de Lisboa; Rua Branca Edmée Marques, edifício IGOT. 1600-276, Lisboa

⁴ Riskam, IGOT, ULisboa/FLUP, UPorto; Via Panorâmica, s/n, 4150-564 Porto; carlosbateira@gmail.com

RESUMO

A erosão hídrica em olivais mediterrânicos representa uma ameaça crescente à sustentabilidade do solo. Este estudo avalia a suscetibilidade à erosão numa parcela em Jaén, utilizando o modelo SIMWE e dados LiDAR de alta resolução. Foram simulados cenários de precipitação (40 mm/h recorrente e 80 mm/h extrema), evidenciando aumento significativo da erosão e transporte de sedimentos sob eventos intensos, com elevada capacidade preditiva na identificação de áreas críticas.

Palavras-chave: *Intensidade da precipitação, Erosão hídrica, Modelação física, SIMWE, Ravinas*

Keywords: *Water erosion, SIMWE, Physically based modeling, Rainfall intensity, Gullies*

1. INTRODUÇÃO

A erosão hídrica dos solos constitui, atualmente, uma das ameaças mais severas à sustentabilidade dos sistemas agrícolas mundiais. Este fenómeno é particularmente crítico em regiões de clima mediterrânico, onde a combinação de relevos acentuados e culturas permanentes, como o olival, cria um cenário de elevada suscetibilidade (Rodrigo Comino *et al.*, 2018). Em Espanha, e especificamente na Andaluzia, a intensificação das práticas agrícolas, frequentemente caracterizada pela manutenção do solo nu nas entrelinhas, aliada a padrões de precipitação cada vez mais irregulares e extremos, tem acelerado os processos de perda de solo. Esta degradação não compromete apenas a produtividade imediata, mas deteriora a qualidade estrutural do solo e os processos ecossistémicos essenciais, como a infiltração e o armazenamento de carbono (García-Ruiz *et al.*, 2013).

No âmbito do projeto LivingSoiLL, o presente estudo tem como objetivo principal avaliar, em dois cenários de precipitação (extremo e recorrente), a suscetibilidade à erosão hídrica nesta parcela, identificando áreas críticas de fluxo superficial e pontos de rotura de declive que catalisam a formação de ravinas.

2. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo (Fig.1) localiza-se numa parcela experimental de olival em sequeiro no município de Torredelcampo (Jaén, Andaluzia). Esta região é caracterizada por um clima mediterrânico com precipitações sazonais frequentemente de elevada intensidade. O terreno apresenta uma topografia

complexa, com declives acentuados onde a presença de áreas de rotura de declive condiciona a convergência do fluxo superficial. O solo é de textura silto-argilosa, o que implica uma condutividade hidráulica moderada a baixa, facilitando a génese de escoamento hortoniano durante eventos de precipitação de elevada intensidade. A área apresenta uma rede erosiva avançada e estabilizada na paisagem, composta por sulcos e ravinas de grandes dimensões, com profundidades entre 0,50 m e 1,25 m e larguras que atingem os 4 metros. A extensão destas formas varia entre os 63 m e os 382 m, evidenciando um processo de erosão acelerada que ameaça a produtividade das oliveiras e a viabilidade operacional da parcela.

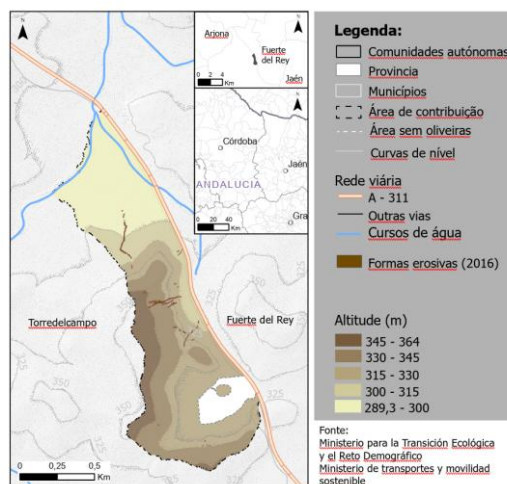


Figura 1. Mapa de contextualização da área de estudo

3. METODOLOGIA

A avaliação da suscetibilidade à erosão hídrica e da dinâmica de transporte de sedimentos foi realizada e estruturada em quatro etapas (Fig.2): preparação de dados, parametrização do modelo, simulação e validação.

Numa primeira fase, foi utilizado um Modelo Digital de Elevação (MDE) de alta resolução, obtido a partir de dados LiDAR, com uma resolução espacial de 0,75 m. Esta resolução permitiu representar com detalhe a microtopografia da área de estudo, incluindo zonas de rotura de declive e formas erosivas já existentes. A partir do MDE, foram derivados mapas de declive e orientação das vertentes no software SAGA GIS. Seguidamente, procedeu-se no mesmo software à parametrização do modelo físico SIMWE (SIMulated Water Erosion), que simula o escoamento e a erosão com base em princípios hidrológicos e hidráulicos (Fernandes *et al.*, 2017). Este modelo permite simular espacialmente os processos de destacamento, transporte e deposição de sedimentos (Fernandes *et al.*, 2017). Foram definidos parâmetros ajustados às características locais, que podem ser consultados no Quadro 1.

Quadro 1. Valores dos parâmetros utilizados no modelo SIMWE

Excesso de precipitação	INFILTRAÇÃO NO SOLO (MM/H)	COEFICIENTE DE RUGOSIDADE DE MANNING	CAPACIDADE DE TRANSPORTE E DESPREENDIMENTO DE SEDIMENTOS (S/M)	CRITICAL SHEAR STRESS (PA)
40 MM/H	1	0.08	0.001	0.5
80 MM/H	1	0.08	0.001	0.5

A simulação foi realizada em duas etapas complementares: primeiro, a modelação do fluxo de água, que permitiu determinar a profundidade e velocidade do escoamento e identificar zonas de concentração do escoamento superficial; depois, a simulação da dinâmica sedimentar, na qual se estimou a capacidade de transporte de sedimentos e o balanço entre erosão e deposição. Este balanço resultou da comparação entre a capacidade de transporte do fluxo e a carga efetiva de sedimentos, permitindo distinguir áreas de erosão ativa e zonas de acumulação. Por fim, os resultados foram validados através da comparação com um inventário de ravinas vetorizadas manualmente, com uma área de aproximadamente 19600 m², através de ortofotomapas dos anos de 2011, 2013, 2016, 2019, 2020, 2022. A capacidade preditiva do modelo foi avaliada com recurso a métrica ROC.

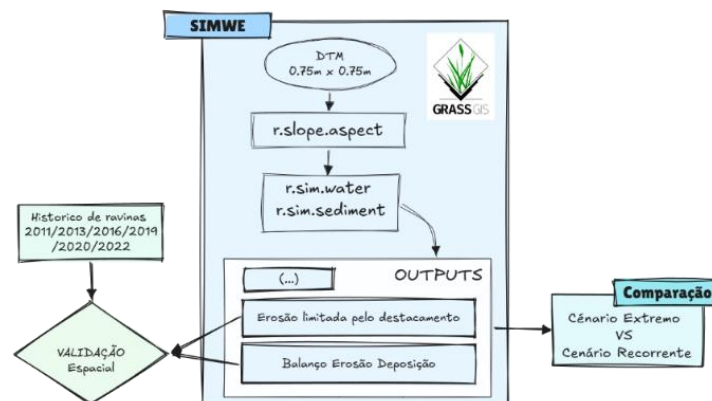


Figura 2. Fluxograma metodológico da modelação da erosão hídrica e comparação entre cenários

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos com o modelo SIMWE (Fig.2) evidenciam alterações significativas na dinâmica erosiva da parcela, observando-se ainda tendência para o alargamento das paredes das ravinas.

A intensidade da precipitação revela-se um fator determinante. O aumento da intensidade pluviométrica, de 40 mm/h para 80 mm/h, provoca uma alteração substancial na dinâmica do sistema. No cenário de 40 mm/h, mais de 57% da área não apresenta mudanças relevantes na capacidade de transporte de sedimentos. Em contraste, no cenário de 80 mm/h, essa percentagem reduz-se drasticamente para 12,96%, indicando uma ativação generalizada dos processos de transporte em praticamente toda a parcela.

Sendo também observado um claro predomínio de áreas de deposição e transporte de sedimentos no cenário de 80 mm/h. Em ambos os cenários, mais de 40% da área atua como recetora ou zona de transferência. Contudo, no cenário extremo (80 mm/h), a área sujeita a balanço negativo (erosão) aumenta para 42,26%, evidenciando que eventos extremos convertem áreas anteriormente estáveis em fontes ativas de sedimentos. A análise do balanço erosão-deposição revela ainda uma elevada percentagem de áreas com balanço positivo (entre 46% e 50%).

O cenário de maior intensidade (SIMWE 80 mm/h) apresenta melhor desempenho preditivo, com valores de precisão de 0,70 e TPR/especificidade de 0,48, evidenciando maior capacidade na identificação de áreas de erosão severa e da rede ativa de ravinamento.

Por outro lado, os cenários de menor intensidade (40 mm/h) apresentam elevada sensibilidade (0,94), o que indica uma boa capacidade na identificação de áreas estáveis. Ainda assim, a maior precisão do cenário de precipitação extremas reforça a sua relevância para o planeamento de medidas de mitigação.

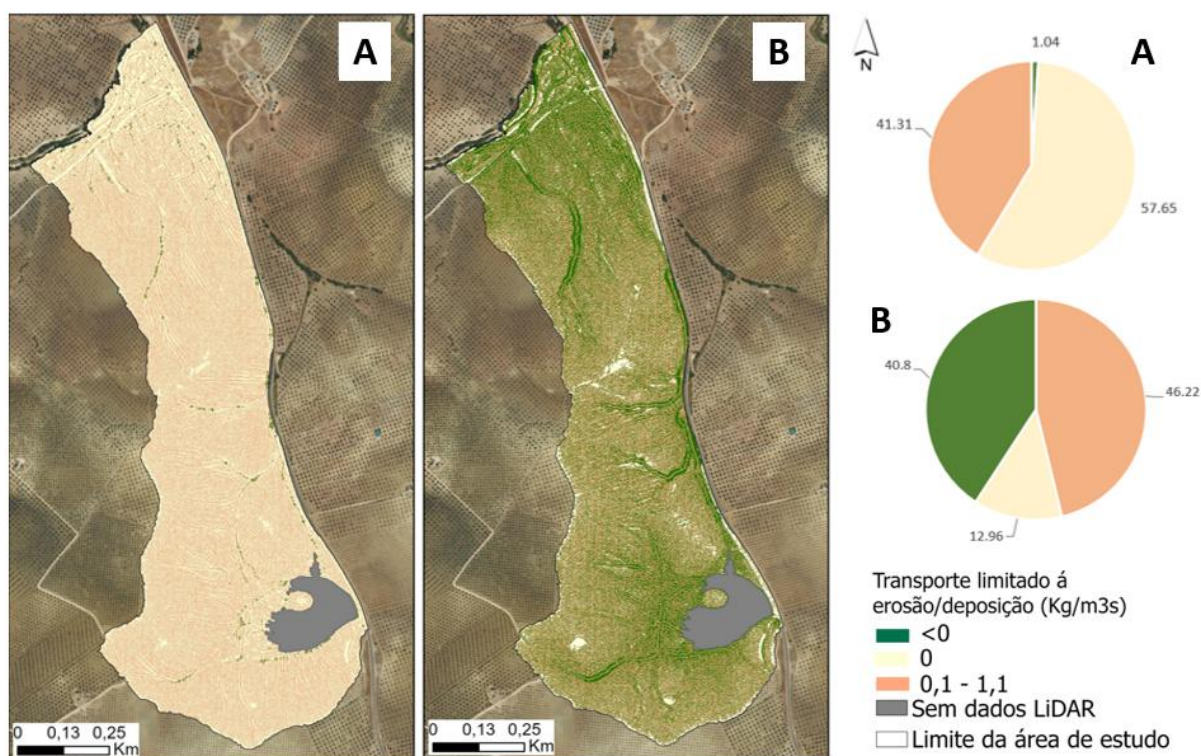


Figura 3. Resultado do modelo SIMWE, transporte limitado por erosão e deposição de sedimentos no cenário 40 mm/h (A) e o cenário 80 mm/h (B)

De forma geral, o modelo SIMWE demonstra uma boa capacidade em reproduzir a distribuição espacial dos processos erosivos, constituindo uma ferramenta robusta para a gestão e conservação do solo. A sua aplicação permitiu compreender, de forma detalhada, a resposta do sistema a diferentes intensidades de precipitação.

5. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos evidenciam uma forte concordância entre as simulações e o histórico de monitorização de ravinas (2011-2022), o que confere elevada robustez preditiva ao modelo. O modelo confirma ainda que as ravinas permanentes não resultam apenas de eventos isolados, mas funcionam como eixos ativos de transporte de sedimentos e agentes contínuos de degradação do solo. Este comportamento ajuda a explicar as elevadas taxas de deposição observadas no interior dessas ravinas (Fig.2): o material proveniente do colapso das margens pode exceder temporariamente a capacidade de transporte do fluxo, originando ciclos alternados de deposição e remobilização em eventos subsequentes de maior intensidade.

A dimensão crítica das ravinas observadas é consistente com a dinâmica erosiva simulada no cenário de 80 mm/h. Em condições de precipitação extrema, a energia do escoamento superficial concentrado é suficientemente elevada para comprometer a integridade estrutural do solo silto-argiloso, desencadeando processos erosivos de grande magnitude. Um aspeto particularmente relevante é que, mesmo no cenário de menor intensidade (40 mm/h), se registam níveis significativos de erosão hídrica. Isto demonstra que eventos pluviométricos mais frequentes possuem energia suficiente para manter ativa a rede erosiva. Por fim, a persistência de taxas de erosão relevantes em ambos o cenário reforça a necessidade de implementação de medidas de intervenção, com vista à redução da erosão hídrica e à preservação do solo.

Agradecimentos

Este trabalho foi financiado pelo projeto LivingSoiLL “Healthy Soil to Permanent Crops Living Labs”, Horizonte Europa financiado pela Comissão Europeia ao abrigo do Grant Agreement 101157502 no âmbito da Missão da UE “A Soil Deal for Europe”.

Este trabalho foi financiado por fundos nacionais através da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P., no âmbito do projeto UID/04084 – Centro de Estudos de Geografia e Ordenamento do Território.

Referências

- Fernandes, J., Bateira, C., Soares, L., Faria, A., Oliveira, A., Hermenegildo, C., Moura, R., & Gonçalves, J. (2017). SIMWE model application on susceptibility analysis to bank gully erosion in Alto Douro Wine Region agricultural terraces. *Catena*, 153, 39–49. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.01.034>.
- García-Ruiz, J. M., Nadal-Romero, E., Lana-Renault, N., & Beguería, S. (2013). Erosion in Mediterranean landscapes: Changes and future challenges. *Geomorphology*, 198, 20–36. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.05.023>.
- Rodrigo Comino, J., Keesstra, S. D., & Cerda, A. (2018). Connectivity assessment in Mediterranean vineyards using improved stock unearthing method, LiDAR and soil erosion field surveys. *Earth Surface Processes and Landforms* (Vol. 43, Número 10, pp. 2193–2206). Wiley. <https://doi.org/10.1002/esp.4385>.

Atributos morfológicos, texturais e químicos dos solos e a relação com a estabilidade de vertente na Serra do Tucano - Amazônia Setentrional

Atributos morfológicos, texturais e químicos dos solos e a relação com a estabilidade de vertente na Serra do Tucano - Amazônia Setentrional

R.A. Alves¹, L.D. Cunha¹

¹ Universidade Federal de Roraima, departamento de Geografia

* raquel.ar@yahoo.com;

* luciana.diniz@ufrr.br

RESUMO

O estudo teve como objetivo avaliar os atributos dos solos e a influência na estabilidade de uma vertente na Amazônia setentrional, considerando características morfológicas, granulometria e atributos químicos que associados às condições de elevada pluviosidade podem afetar as propriedades dos solos e intensificar erosivos das encostas. Os resultados indicaram que a interação entre textura, estrutura e fatores químicos do solo, como principais agentes desestabilizadores, como os elevados teores de alumínio são fatores que podem atuar na desestruturação do solo e favorecer a ocorrência de rupturas na encosta.

Palavras-chave: *Pedologia; Amazônia Setentrional; Solos intemperizados; instabilidade de vertentes.*

Keywords: *Pedology; Northern Amazon; Weathered soils; Slope instability.*

1. INTRODUÇÃO

O estudo das vertentes engloba a análise de processos e formas, a erosão que ocorre em uma vertente é o resultado de processos como salpicamento, escoamento superficial e de processos químicos que, por sua vez, dependem das características morfológicas da vertente, das propriedades do solo e da vegetação existente (Christofolletti, 1980). Em ambientes tropicais úmidos, como a Amazônia, a dinâmica das vertentes é influenciada pelas características dos solos altamente intemperizados e pelo regime pluviométrico, que favorecem processos de infiltração, saturação, transporte e deposição de materiais, fatores que podem influenciar nos mecanismos de estabilidade das encostas e formar setores mais rejuvenecidos pela erosão (Schaefer *et al.*, 2017).

Os solos da região amazônica, apresentam em geral, acidez elevada, baixa fertilidade natural e presença significativa de alumínio, tais fatores que podem comprometer a estrutura e a resistência dos materiais que sustentam as vertentes (Silva *et al.*, 2021). Além disso, variações texturais nos diferentes setores formam de zonas de acúmulo de água influenciam na estabilidade dos agregados, que são componentes essenciais da estrutura do solo, importantes para manutenção da porosidade, aeração, infiltração de água e no controle dos processos erosivos. Muitos fatores influenciam a estabilização dos agregados. Por exemplo, o tipo e a quantidade de argila, óxidos e hidróxidos de ferro, alumínio e substâncias orgânicas, além dos ciclos de umedecimento e secagem.

Assim, o presente estudo tem como objetivo avaliar os atributos morfológicos, físicos e químicos dos solos e a relação com a estabilidade de uma vertente na Serra do Tucano, Brasil, sendo esse base para estudos posteriores.

2. ÁREA DE ESTUDO

A Serra do Tucano, no norte da Amazônia (Figura 1), é um remanescente sinclinal submetido a um clima quente úmido, com litologia composta por rochas areníticas do Cretáceo superior, o substrato rochoso aflora com sequências de morros e colinas escalonadas com vales abertos, colinas dissecadas e colinas amplas (Alves e Beserra Neta, 2018). A savana, cobre as áreas mais elevadas das encostas, enquanto o remanescente é coberto por pastagens e cultivo de soja.

A vertente analisada apresenta terço superior convexo, com 10% de declividade, afloramentos de blocos rolados e predominância de Plintossolos. No terço médio (185 m de altitude e 4% de declividade), observa-se leve concavidade, com declive mais retilíneo e ocorrência de Plintossolos e Gleissolos. O terço inferior, próximo ao nível de base local (162 m e 1% de declividade), é caracterizado por Gleissolos saturados, de textura arenosa e com presença de mosqueados.

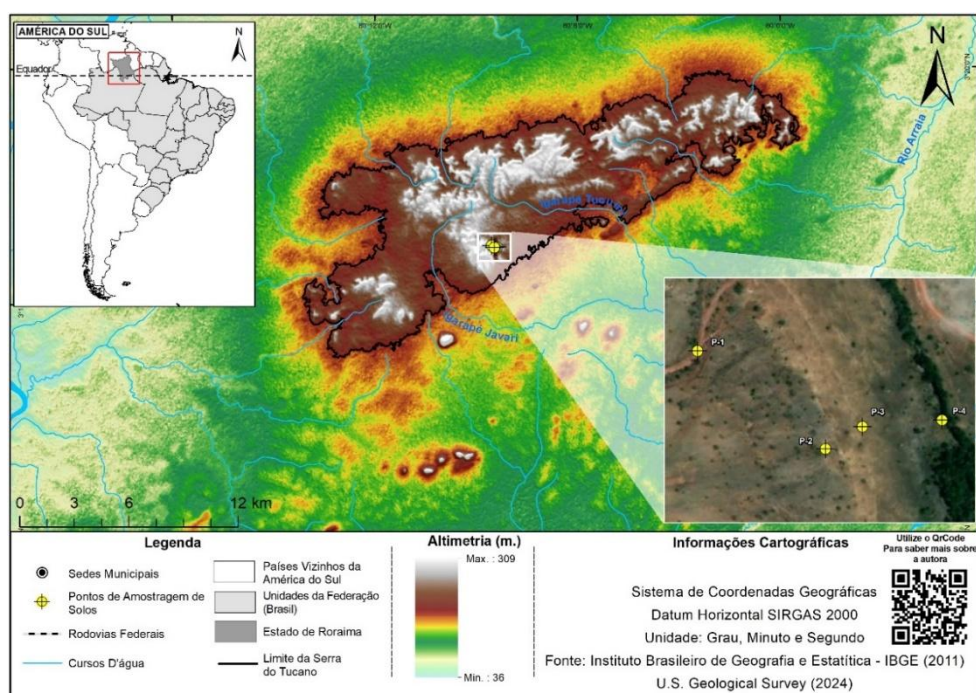


Figura 1 Localização da área de estudo, com destaque para os pontos de amostragem dos perfis onde foram coletadas amostras de solo na Serra do Tucano.

3. METODOLOGIA

Em cada terço da vertente (superior, médio e inferior) foram analisados os solos até a profundidade de 150 centímetros. Para cada perfil foi realizada a descrição morfológica em campo e coletadas amostras deformadas em cada horizonte dos solos conforme Santos et al. (2015). Ao todo, 15 amostras foram encaminhadas para análise granulométrica e química em laboratório. Os solos tiveram a sua classificação realizada, segundo os critérios constantes no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2025).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

No terço superior da vertente o solo foi classificado como Plintossolo Pétrico Concrecionário êndico, o qual apresentou elevados teores de argila (56–62%), estrutura moderada em blocos subangulares e consistência dura a firme quando seca, tornando-se plástica e pegajosa em condições úmidas. O predomínio de poros muito pequenos, favorece a retenção de água. Quimicamente, observa-se baixa saturação por bases (V entre 4 e 7%) e alta saturação por alumínio (m até 85%) tendenciando à dispersão das partículas, principalmente em condições úmidas, o que indica baixa estabilidade estrutural em condições de saturação. Esses atributos sugerem que, embora o solo apresente boa coesão em condição seca, há significativa redução da resistência ao cisalhamento quando úmido, favorecendo processos de instabilidade.

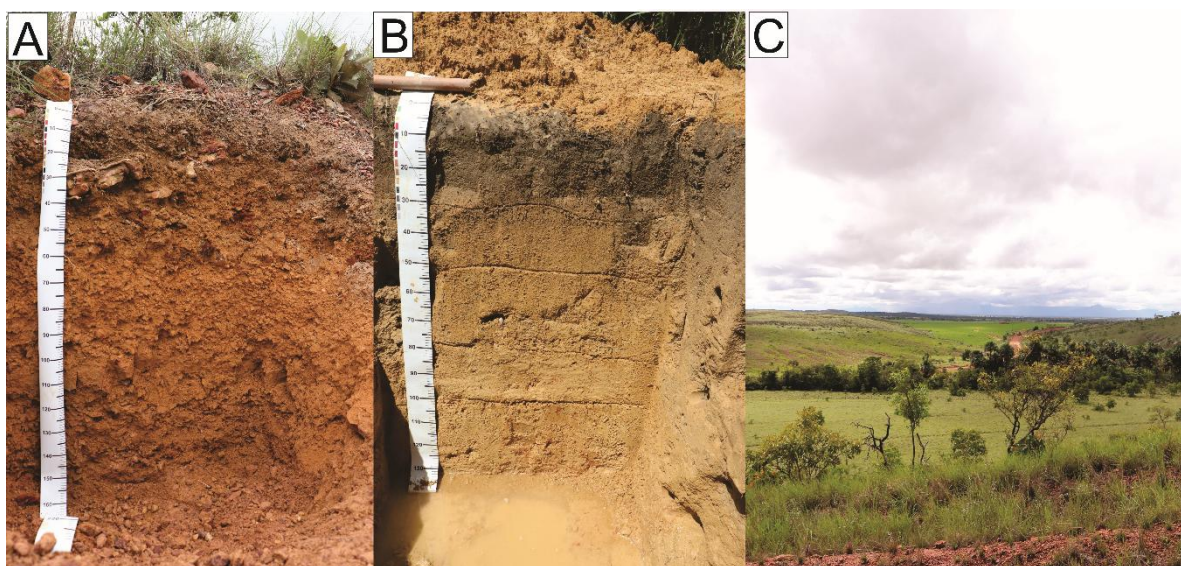


Figura 2 (A) Plintossolo Pétrico Concrecionário êndico. (B) Gleissolo Háplico Ta Distrófico típico com retenção de água. (C) Conformação da paisagem savânica com plantio de soja.

No terço médio da vertente foram analisados dois tipos de solos, o primeiro, Plintossolo Argilúvico Alítico distrófico, com variação textural entre horizontes (argila variando de 18% a 44%) associada a transições planas e descontinuidades ao longo do perfil. A consistência plástica e pegajosa, aliada à elevada acidez (pH 5,0) e altos valores de acidez potencial ($H+Al$ 23,5 cmolc kg^{-1}), indica baixa agregação estrutural. A elevada saturação em alumínio (m superior a 80%) contribui para a dispersão das partículas, aumentando a suscetibilidade à formação de planos de ruptura, especialmente em profundidade.

O segundo solo, corresponde a um Gleissolo Háplico Ta Distrófico típico, este apresentou características típicas de ambientes hidromórficos, evidenciadas pelas cores acinzentadas (2.5Y) e pela consistência firme a ligeiramente plástica. A textura varia de média a argilosa, com teores de argila entre 28% e 43%. A presença de poros pequenos e comuns indicou baixa drenagem, favorece a saturação frequente do solo. Do ponto de vista químico, observou-se redução da saturação por bases em profundidade (V 31%), associada à permanência de umidade elevada. Essas condições promovem aumento da pressão de poros e redução da resistência mecânica, tornando o perfil suscetível a movimentos de massa, especialmente escorregamentos superficiais.

No terço inferior, o Gleissolo Háplico Alumínico neofluviológico apresentou camada superficial de textura mais arenosa (até 66% de areia), estrutura fraca a maciça e consistência friável e não plástica,

o que indica baixa coesão. Em profundidade, há aumento de argila (até 45%), formando uma barreira à infiltração de água. Essa configuração favorece o acúmulo hídrico nos horizontes subsuperficiais. Quimicamente, destacam-se a elevada acidez ($\text{pH} < 5,1$), altos teores de alumínio trocável (até $2,2 \text{ cmolc kg}^{-1}$) e valores elevados de acidez potencial ($\text{H+Al } 36,8 \text{ cmolc kg}^{-1}$), com saturação por alumínio atingindo 94%. Esses fatores promovem intensa dispersão das partículas e baixa estabilidade estrutural, aumentando significativamente a suscetibilidade à erosão.

5. CONCLUSÕES

De forma geral, observa-se que a combinação de: (i) contrastes texturais ao longo dos perfis, que induzem a formação de zonas de acúmulo hídrico, (ii) predominância de poros pequenos, que favorecem a retenção de água e o aumento da pressão interna e (iii) a elevada acidez e presença de alumínio, que comprometem a agregação do solo; são os principais fatores que associados ao regime pluviométrico amazônico, podem atuar desagregação de partículas do solo e das rochas e desencadear os processos de instabilidade da vertente.

Agradecimentos

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento: 001 pelo apoio financeiro que permitiu a realização desta pesquisa. Ao Gruparr pelo apoio técnico científico.

Referências

- Alves, R.A.; Beserra Neta, L.C. (2018). Compartimentação geomorfológica e classificação morfológica dos ambientes lacustres nas savanas da região nordeste de Roraima. v. 12, n 29, p.1-18 2018. Revista Acta Geográfica: UFRR,
- Christofolletti, A. (1980). Geomorfologia. 188 p. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher.
- Santos, R. D., Lemos, R. C., Santos, H. G., Ker, J. C., Anjos, L. H. C. (2015). Manual de descrição e coleta de solo no campo. 7ª ed. (revista e ampliada). p.100. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo.
- Schaefer, C.E.G.R.; Lima, H. N.; Teixeira, W. G.; Vale Júnior, J. F.; Souza, K. W.; Corrêia, G. R.; Mendonça, B. A.F.; Amaral, E. F.; Campos, M. C.C.; Ruivo, M. L. P. (2017). Solos da Região Amazônica. In: Curi, N.; Ker, J. C.; Novais, R. F.; Vidal-Torrado, P.; Schaefer, C.E.G.R. Pedologia: solos dos biomas brasileiros. Capítulo: III, p.111-176. ed: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo.
- Santos, H. G. dos et al. (2025). Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 393p. 6. ed. Brasília, DF: Embrapa.
- Silva, L.M. Pereira, M. G., Moreira, F. M. S., Wadt, P. G. S., Polidoro, J. C. (2021). Solos da Amazônia Ocidental: base da sustentabilidade agrícola e ambiental. 130 p. Brasília - DF : Embrapa.

Contributo das redes sociais na elaboração de inventários de movimentos de vertente durante eventos meteorológicos extremos

The role of social media in compiling landslide inventories during extreme weather events

L. C. D. R. Rodrigues^{1*}, S. Pereira^{2,3}

¹ Mestrado em Sistemas de Informação Geográfica e Ordenamento do Território, Dep. de Geografia, Faculdade de Letras da Universidade do Porto; Via Panorâmica, s/n, 4150-564 Porto; lucasdc@hotmail.com*

² Centro de Estudos em Geografia e Ordenamento do Território, Faculdade de Letras da Universidade do Porto; Via Panorâmica, s/n, 4150-564 Porto; sspereira@letras.up.pt

³ Centro de Estudos Geográficos, IGOT, Universidade de Lisboa; Rua Branca Edmée Marques, edifício IGOT. 1600-276, Lisboa

RESUMO

Este estudo utiliza publicações do Facebook, realizadas entre 28 de janeiro e 11 de fevereiro de 2026, para identificar a distribuição espacial e temporal de movimentos de vertente danosos em Portugal continental associados à ocorrência de depressões atmosféricas. Com o uso de palavras-chave padronizadas no Google, identificaram-se 333 ocorrências em 477 publicações no Facebook, as quais foram agregadas por dia e por município. O método adotado tem potencial para minimizar subnotificações e apoiar o monitoramento, em tempo quase real, de ocorrências de movimentos de massa danosos.

Palavras-chave: *Movimentos de vertente; Inventário; Facebook; Google; Depressões atmosféricas.*

Keywords: *Landslides; Inventory; Facebook; Google; Atmospheric depressions.*

1. INTRODUÇÃO

Entre 2 de janeiro e 11 de fevereiro de 2026, sete depressões atmosféricas e uma superfície frontal afetaram Portugal continental com precipitação intensa, ventos fortes e, pontualmente, neve em cotas médias e baixas (IPMA, 2026a, 2026b). A partir de 27 de janeiro, a depressão Kristin, caracterizada pelo elevado volume de precipitação e por correntes descendentes de ar que atingiram velocidades de até 150 km/h, intensificou esses efeitos e gerou movimentos de vertente, inundações, quedas de árvores, cortes de vias e danos significativos na infraestrutura energética em várias regiões do país (IPMA, 2026b). As condições meteorológicas verificadas nesse período contribuíram para a extrema saturação do solo (IPMA, 2026a), reduzindo a capacidade de infiltração e intensificando o escoamento superficial.

De modo geral, o elevado volume pluviométrico reduziu a resistência ao corte em áreas suscetíveis à instabilidade e potencializou a ocorrência de movimentos de vertente generalizados em todo o território continental. Diante desse cenário, este trabalho tem como objetivo desenvolver um método de identificação rápida de ocorrências de movimentos de vertente danosos por meio da análise de notícias e de informações publicadas no Facebook.

2. ÁREA DE ESTUDO

Portugal continental apresenta clima temperado, caracterizado por verões secos e invernos chuvosos, de acordo com a escala Köppen-Geiger (IPMA, 2026c, 2026d). A precipitação média anual é de aproximadamente 900 mm, concentrada sobretudo entre dezembro e fevereiro (Miranda et al., 2006). A distribuição espacial deste fenómeno é heterogénea, com valores mais elevados concentrados na região noroeste e uma diminuição progressiva em direção ao sul (Miranda et al., 2006).

No que diz respeito aos movimentos de vertente desencadeados pela precipitação, a sua ocorrência está diretamente associada à duração e à intensidade dos episódios pluviométricos e aos fatores geológicos e geomorfológicos das regiões afetadas (Zêzere, 2023).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A inventariação de movimentos de vertente geralmente baseia-se na consulta de registos históricos presentes em jornais de abrangência nacional, regional e local, tal como descrito por Zêzere et al. (2014), ou na interpretação de fotografias aéreas ou de ortofotomapas de áreas afetadas por este tipo de fenómeno (Guillard e Zêzere, 2012; Villaça et al., 2026). Apesar de eficazes, ambos os métodos demandariam demasiado tempo, dados e recursos para a identificação de ocorrências à escala nacional. Em face dessas limitações, desenvolveu-se uma metodologia de identificação rápida de movimentos de vertente que se baseia na recolha de informações contidas em publicações do Facebook, por meio do uso de palavras-chave padronizadas no buscador do Google que: i) restringiam as pesquisas ao domínio do Facebook, ii) incluíam palavras-chave associadas aos movimentos de vertente (e.g. derrocada, deslizamento, desmoronamento) e iii) definiam o período de análise.

Neste estudo, foram analisadas as publicações realizadas no Facebook entre 28 de janeiro e 11 de fevereiro no território continental de Portugal, coincidindo com a passagem das depressões Kristin, Leonardo e Marta e de uma superfície frontal associada à depressão Nils. As ocorrências foram sistematizadas numa base de dados com atributos de identificação e dados temporais, espaciais e descritivos dos eventos registados. Em seguida, os eventos foram agregados e georreferenciados ao nível do município.

O período anterior a 28 de janeiro não foi avaliado, pois o recorte temporal foi estabelecido para captar os efeitos da depressão Kristin e posteriores. Entretanto, destaca-se que a metodologia adotada permite analisar qualquer período de interesse.

4. RESULTADOS

Entre 28 de janeiro e 11 de fevereiro de 2026 foram identificadas 477 publicações no Facebook, provenientes de 235 autores/utilizadores únicos, que permitiram registar 333 movimentos de vertente ocorridos em Portugal continental, dos quais apenas três careciam de informações geográficas ao nível municipal. Em média, foram registados cerca de 22 movimentos de vertente por dia.

Em 7 dos 15 dias analisados (47% do total), o número de movimentos de vertente registados superou a média diária, com destaque para os dias 5 e 11 de fevereiro, que apresentaram 65 e 40 episódios desse fenómeno, respetivamente (Figura 1).

No total, registaram-se 223 movimentos de vertente (67% do total) durante a passagem de depressões, dos quais 148 estão associados às depressões de Leonardo/Marta, 67 à de Nils e 8 à de Kristin.

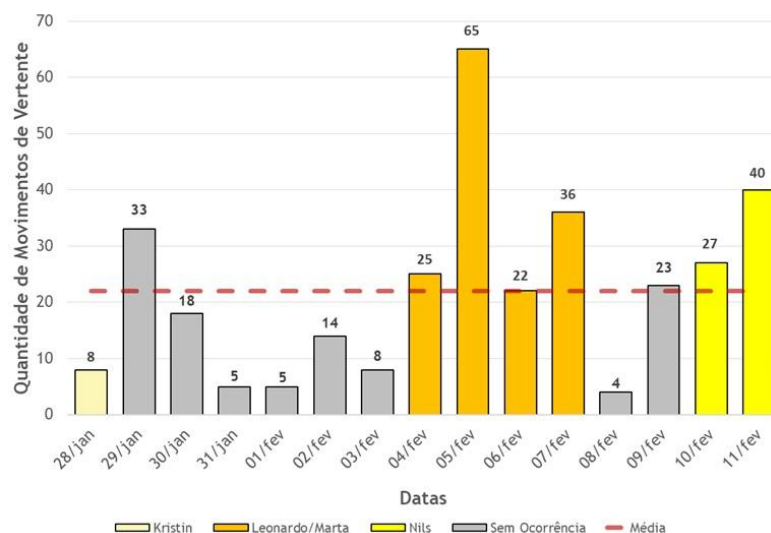


Figura 1. Número de movimentos de vertente registados nas publicações do Facebook entre 28 de janeiro e 11 de fevereiro de 2026.

A distribuição espacial dos movimentos de vertente (Figura 2) mostra que os distritos de Lisboa, Setúbal, Santarém, Coimbra, Leiria, Aveiro, Castelo Branco, Viseu, Vila Real e Viana do Castelo concentram os municípios com maior número de ocorrências.

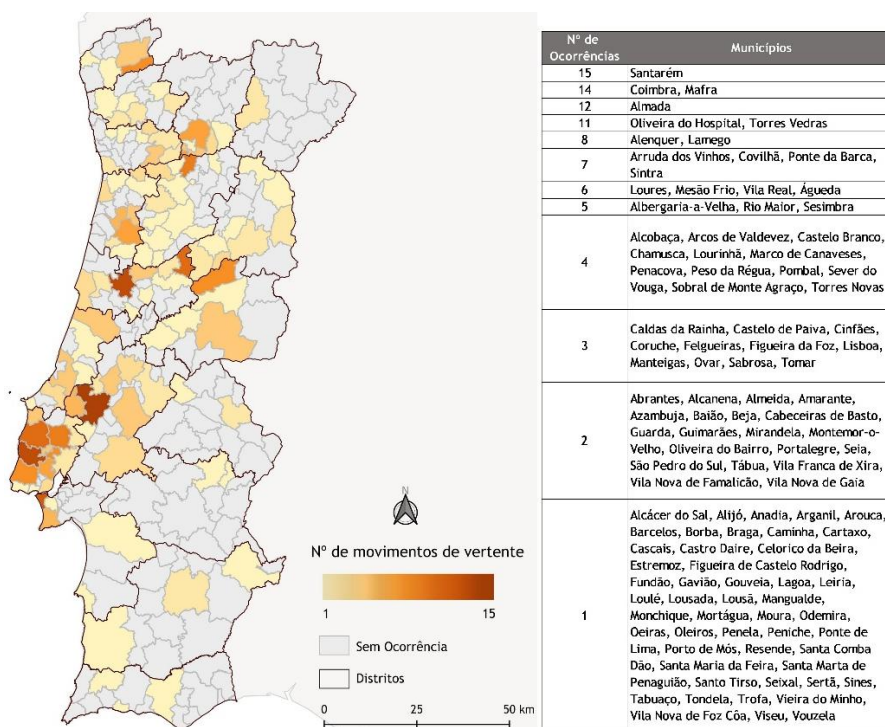


Figura 2. Ocorrências de movimentos de vertente por município.

Os movimentos de vertente identificados neste estudo afetaram um total de 111 municípios, dos quais 6 (5,4%) apresentaram entre 11 e 15 movimentos de vertente, 13 (11,7%) entre 5 e 8 e os demais 92 (82,9%) entre 1 e 4. Dentre esses municípios, destacam-se Santarém (15 ocorrências), Coimbra e Mafra (14 ocorrências), Almada (12 ocorrências), Oliveira do Hospital e Torres Vedras (11 ocorrências), que foram os concelhos mais afetados pela sequência de depressões registadas no período analisado.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O método proposto mostrou potencial para identificar e analisar a distribuição temporal e espacial dos movimentos de vertente reportados em publicações no Facebook e para contribuir para a redução da subnotificação de movimentos de menor magnitude, que geralmente não são reportados por instituições técnicas responsáveis. As publicações, frequentemente acompanhadas de conteúdos multimédia associados aos movimentos de vertente registados, podem auxiliar na caracterização da tipologia desses fenómenos (p. ex., deslizamentos translacionais, rotacionais, escoadas, entre outros), dos materiais mobilizados e dos danos associados. Adicionalmente, a presença de informação geográfica à escala do município e, em diversos casos, à escala da freguesia ou dos trechos das vias de transporte afetados pode apoiar o monitoramento das áreas atingidas e, em casos específicos, a gestão das infraestruturas impactadas pelos movimentos de massa.

A metodologia poderá ainda acelerar a identificação de áreas prioritárias para a realização de inventários de campo detalhados em contextos de eventos meteorológicos extremos em larga escala e apoiar processos de monitoramento quase em tempo real. Futuramente, este estudo focará na validação e avaliação da exatidão geográfica das informações recolhidas.

Referências

- Guillard, C., & Zêzere, J. L. (2012). Landslide susceptibility assessment and validation in the framework of municipal planning in Portugal: The case of Loures Municipality. *Environmental Management* 50, 721–735. <https://doi.org/10.1007/s00267-012-9921-7>.
- IPMA. (2026a). Boletim climatológico: Janeiro 2026, Portugal Continental (ISSN 2183-1076). <https://www.ipma.pt/pt/oclima/boletins.climaticos/>.
- IPMA. (2026b). Boletim climatológico: Fevereiro 2026, Portugal Continental (ISSN 2183-1076). <https://www.ipma.pt/pt/oclima/boletins.climaticos/>.
- IPMA. (2026c). Normais climáticas. Instituto Português do Mar e da Atmosfera. <https://www.ipma.pt/pt/oclima/normais.clima/>.
- IPMA. (2026d). Tempo e clima. Instituto Português do Mar e da Atmosfera. <https://www.ipma.pt/pt/educativa/tempo.clima/>.
- Miranda, P. M. A., Ramos, A. M., & Guerreiro, S. B. (2006). O clima de Portugal nos séculos XX e XXI / The Portuguese climate in the 20th and 21st centuries. In F. D. Santos & P. Miranda (Eds.), *Alterações climáticas em Portugal – Cenários, impactos e medidas de adaptação – Projecto SIAM_II* (1ª ed., pp. 49–113). GRADIVA – Publicações, Lda. https://www.researchgate.net/publication/234059594_O_clima_de_Portugal_nos_seculos_XX_e_XXIThe_Portuguese_climate_in_the_20th_and_21st_centuries.
- Villaça, C., Santos, P. P., Morais, A. R., Oliveira, S. C., & Zêzere, J. L. (2026). Unveiling the drivers of rainfall-triggered landslide spatial distribution: Insights from event-based and historical landslide inventories in Lisbon region, Portugal. *Geomorphology*, 500, 110222. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2026.110222>.
- Zêzere, J. L. (2023). Geohazards in Portugal: A state of the art. *Finisterra*, 58(124), 7–27. <https://doi.org/10.18055/Finis33142>.
- Zêzere, J. L., Pereira, S., Tavares, A. O. et al. (2014). DISASTER: A GIS database on hydro-geomorphologic disasters in Portugal. *Nat Hazards* 72, 503–532. <https://doi.org/10.1007/s11069-013-1018-y>.

Dinâmica do Relevo e Intervenção Antrópica na Serra do Tepequém, Amazônia setentrional: Uma Abordagem Cartográfica de feições Erosivos e Depositionais

Relief Dynamics and Anthropic Intervention in the Serra do Tepequém, Northern Amazon: A Cartographic Approach to Erosional and Depositional Features

L. C. Beserra Neta^{1*}, S. S. Tavares Júnior¹, A. Gomes²

¹ Universidade Federal de Roraima, Instituto de Geociências, Roraima-Brasil

² Universidade do Porto, Departamento de Geografia, Centro de Est. de Geog. e Ordenamento do Território, Portugal

* luiza.camara@ufr.br; stelio.tavares@ufr.br e albgomes@gmail.com

RESUMO

Este estudo analisa o modelado do relevo na Serra do Tepequém, focando-se na interação entre a dinâmica natural e a intervenção humana, que potenciou a geração de feições erosivas e deposicionais. A metodologia integrou fotointerpretação geológico-geomorfológica, com base em dados de campo, imagens de drone (ortofotos) e de Sentinel-2 e modelos digitais de elevação (InSAR/MDE). A análise revelou um predomínio de feições erosivas e deposicionais, moldadas pela dinâmica dos processos erosivos nas vertentes e nos fundos de vale, com predomínio de feições erosivas lineares nas planícies de inundação e nos fundos de vale, bem como a presença de depósitos arenosos sob a forma de barras laterais.

Palavras-chave: Cartografia geomorfológica, Paisagem, Atividade antrópica, Serra do Tepequém

Keywords: Geomorphological mapping, Landscape, Anthropic activity, Tepequém Mountains

1. INTRODUÇÃO

A análise cartográfica do relevo permite identificar as dinâmicas de erosão e deposição que moldam a paisagem. Essa análise mostra como os processos naturais e a intervenção antrópica convergem para a sua transformação contínua. A mineração artesanal de pequena escala, especificamente a extração de diamantes em depósitos superficiais, é uma atividade socioeconômica complexa que imprime alterações significativas na paisagem (Diogens *et al.*, 2024). Neste contexto, a Serra do Tepequém, no extremo setentrional da Amazônia brasileira, em Roraima (Figura 1), apresenta um mosaico de feições erosivas e deposicionais que evidenciam uma evolução geomorfológica resultante da interação entre processos geológicos e geomorfológicos e de severas intervenções antrópicas. A morfologia local foi profundamente impactada pela exploração diamantífera, que predominou entre 1937 e o final do século XX.

Assim, a investigação da influência da atividade garimpeira diamantífera na dinâmica de agradação e degradação da Serra do Tepequém é fundamental para compreender a evolução contínua da paisagem. Atualmente, a área apresenta inúmeras formas de intensa erosão linear, caracterizadas pela ampla distribuição espacial e por dimensões morfológicas significativas. A deflagração desses processos erosivos tem sido atribuída à vulnerabilidade física dos solos e às estruturas geológicas da área, intensificadas pela atividade garimpeira diamantífera (Beserra Neta *et al.* 2007).

Este estudo apresenta os resultados da cartografia geomorfológica detalhada da Serra do Tepequém, focado na análise das formas de relevo e dos canais modificados pelo garimpo histórico de diamantes.

2. ÁREA DE ESTUDO

A Serra do Tepequém constitui um modelado desenvolvido em arenitos, siltitos, argilitos e conglomerados de idade Paleoproterozóico e em rochas vulcânicas ácidas a intermédias (Fernandes Filho et al., 2012). A sua compartimentação geomorfológica caracteriza-se por superfícies aplanadas com altitudes entre 575 m e 670 m. Este domínio é delimitado por relevos residuais (orientação NE-SW) que atingem 744 m, bem como por vertentes circundantes com altitudes máximas de 1.100 m. Nesta paisagem domina a savana arbustiva graminosa e a floresta ombrófila densa, que recobre as escarpas envolventes. Segundo a classificação de Köppen, o clima da região é tropical úmido (Am), com sazonalidade bem definida. O regime pluviométrico alterna entre uma fase seca, de setembro a março, e uma estação chuvosa, de abril a agosto, com precipitação média anual entre 1.800 mm a 2.250 mm. A temperatura média anual situa-se em torno de 25 °C (Beserra Neta et al., 2015).

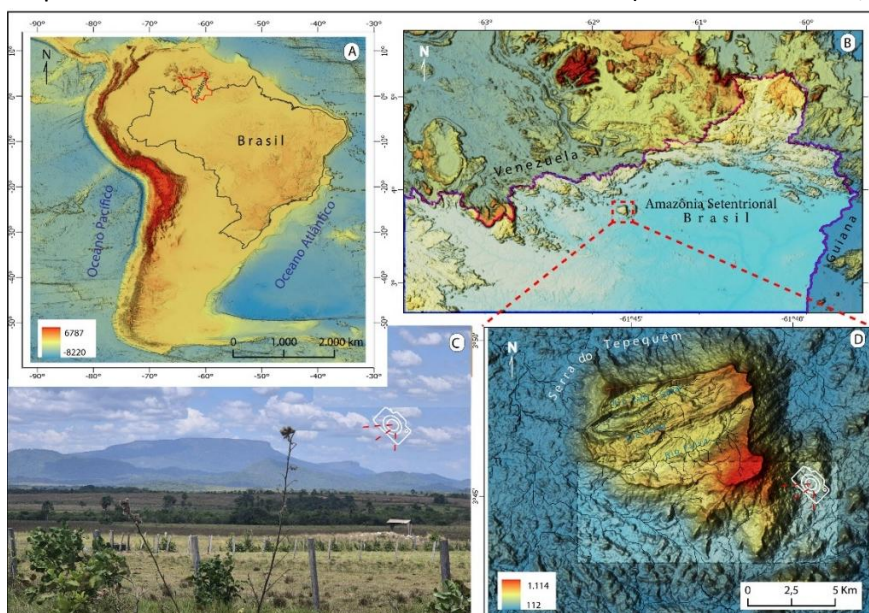


Figura 1. Localização da área de estudo: (A) O estado de Roraima na Amazônia setentrional; (B) Serra do Tepequém, localizada no norte de Roraima; (C) Modelado da Serra do Tepequém na paisagem regional e (D) o Modelo Digital de Elevação

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A investigação fundamentou-se em uma abordagem multiescalar e integrada, estruturada a partir de: (a) análise multitemporal de imagens Sentinel-2 para a compartimentação de padrões de relevo e espacialização de impactos antrópicos; (b) levantamento aerofotogramétrico detalhado via drone (Mavic 2 DJI) que permitiu a geração de Modelos Digitais de Terreno (MDT) de alta resolução (3 cm de pixel); (c) validação dos dados por investigações de campo e mensurações morfométricas para o inventário de processos erosivos e deposicionais. O processamento e a integração do banco de dados geoespaciais ocorreram em ambiente SIG (ArcGIS Pro), com refinamento cartográfico em software de edição vetorial (Adobe Illustrator), sob a ótica da geomorfologia antropogénica. Como síntese, elaborou-se o mapeamento geomorfológico da Serra do Tepequém na escala 1:130.000, acompanhado de mapas de detalhe para setores específicos, i.e., algumas drenagens e o entorno.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise geomorfológica das bacias hidrográficas na Serra do Tepequém evidencia um contraste dinâmico entre o balanço denudacional e deposicional, cujo comportamento é regido pelos gradientes topográficos e pela interferência antrópica pretérita.

No alto curso do rio Cabo Sobral, a organização das cabeceiras de drenagem em patamares elevados, intercalados por rupturas de declive acentuadas, potencia a capacidade erosiva do escoamento superficial. Tal configuração morfoestrutural favorece a incisão vertical e o desenvolvimento de vales encaixados com seção transversal em "V", caracterizando um domínio de forte erosão remontante e de transporte de sedimentos.

Nos setores médios a jusante, observa-se uma alteração na dinâmica sedimentar, na qual a redução do gradiente hidráulico promove a deposição de material coluvionar e aluvionar. Nessa transição, a morfologia original foi intensamente reconfigurada por atividades mineiras históricas, o que resultou na gênese de terraços antropogênicos. Essas feições, resultantes de desmontes hidráulicos associados à extração diamantífera, correspondem a depósitos tecnogénicos que alteraram a geometria dos terraços, consolidando uma morfologia herdada da atividade antropogénica.

No setor correspondente ao curso do rio Barata, a dinâmica superficial é marcada por processos erosivos lineares intensos, exemplificados pela voçoroca do Barata — feição monitorizada de forma contínua desde 2003 (Beserra Neta et al. 2024) — que constitui uma incisão de controlo litoestrutural seguindo o contato geológico entre siltitos e arenitos, na direção NE-SW. Esta feição apresenta dimensões expressivas, com área de 44.143,8 m² e um volume de material erodido estimado em 106.026,80 m³, estruturando-se em um talvegue de 879,7 m de extensão e declive de 16°. A morfometria do canal varia de perfis em "V" a montante para perfis em "U" a jusante. Apresenta profundidades entre 5 e 10,7 m e larguras entre 8 e 14,2 m. A configuração do setor médio, caracterizada por maior abertura do canal e por rupturas de declive nos taludes, reflete a herança antropogénica decorrente da atividade mineira artesanal, hoje inativa. A estabilidade dos taludes da voçoroca é comprometida por mecanismos de solapamento, movimentos de massa e processos de *piping*, que aceleram o recuo das cabeceiras e a expansão lateral da incisão.

No setor do rio Paiva, a morfodinâmica atual é caracterizada por depósitos arenosos expressivos dispostos nas margens, os quais evidenciam processos de denudação acelerada, decorrentes da supressão da vegetação ripária e da desestabilização do horizonte superficial do solo (Figura 2).

Essa configuração deposicional associa-se a feições antropogénicas remanescentes, representadas por depressões tecnogénicas. Tais geoformas, originadas por escavações de mineração diamantífera pretérita, correspondem a pequenas lagoas marginais, com áreas entre 485,71 e 3.362,54 m², configurando uma alteração significativa na morfometria original do vale e na dinâmica hidrossedimentar local.



Figura 2. Intervenções antropogénicas no rio Paiva: (A) Localização do rio Paiva e as planícies de entorno, modeladas; (B) antropogénicas; (C) destaque para as cavas de mineração artesanal e extensas áreas de acumulação.

5. CONCLUSÃO

A partir dos dados expostos, conclui-se que a compartimentação geomorfológica da Serra do Tepequém reflete uma interação complexa entre o controlo litoestrutural e a evolução tecnogénica das vertentes e dos canais. Enquanto o alto curso do rio Cabo Sobral preserva uma dinâmica natural marcada por forte incisão vertical e balanço denudacional positivo, os setores médios e baixos revelam uma morfologia herdada, na qual a atividade de mineração diamantífera pretérita atuou como agente geomorfológico direto. A gênese de terraços antropogénicos e lagoas tecnogénicas alterou a geometria original dos vales, consolidando feições que hoje condicionam o fluxo hídrico e o armazenamento sedimentar, evidenciando que a paisagem atual é a soma de processos naturais e de interferências antrópicas históricas.

Ademais, a análise da voçoroca do rio Barata e dos depósitos arenosos do rio Paiva demonstra que a instabilidade atual do terreno é acentuada pela fragilidade das zonas de contato geológico e pela perda de cobertura vegetal. A magnitude dos processos erosivos lineares e a ocorrência de fenómenos de *piping* e solapamento indicam um ajuste morfoestrutural contínuo, em que o balanço sedimentar é acelerado pela herança de solos desestruturados. Em suma, a Serra do Tepequém apresenta um quadro de evolução geomorfológica recente, marcado pela transição de sistemas naturais para sistemas antropogénicos, exigindo monitorização contínua para a compreensão dos mecanismos de recuo de cabeceiras e da dinâmica de transporte e deposição de tecnogénicos à escala de bacia hidrográfica.

Referências

Beserra Neta, L.C., Gomes, A.A.T. & Tavares Júnior, S.S. (2024) Gullies at the Serra do Tepequém, Northern Brazilian Amazon: morphometry and soils [Ravinas na Serra do Tepequém, Amazônia Norte brasileira: morfometria e solos] In: X Congresso Nacional de Geomorfologia – Dinâmicas geomorfológicas no espaço e no tempo. V. XII, Lisboa: IGOT, Universidade de Lisboa (ISBN: 978-972-636-312-5).

- Beserra Neta, L.C., Costa, M.L. & Borges, M.S.(2007) Contribuição da atividade Garimpeira diamantífera na intensificação das frentes erosivas lineares por voçorocamento na serra do Tepequém-Roraima [Contribution of diamond mining activity to the intensification of linear erosion fronts by gully erosion in the Tepequém mountain range, Roraima], *Acta Geográfica*, Ano I. Vol. I., 10.5654/actageo2007.0101.0005
- Beserra Neta, L.C., Tavares Júnior, S.S. & Costa, M.L. (2015) Tepequém Mountains: A Relict Landscape in the Northern Amazon [Montanhas Tepequém: Uma Paisagem Relíquia no Norte da Amazônia]. In: Vieira, B. C., Salgado, A. A. R. & Santos, L. J. C. (Eds.), *Landscapes and Landforms of Brazil* (Chapter 24, pp. 265-273), Elsevier, DOI 10.1007/978-94-017-8023-0
- Diogens, C.J., Alencar, N.I. & Benvenga, M.A.C. (2024) The impact of gold mining on regional development in Brazil [O impacto da mineração de ouro no desenvolvimento regional no Brasil]. *European Journal of Sustainable Development Research*, 8(2), em0256, <https://doi.org/10.29333/ejosdr/14471>
- Fernandes Filho, L.A, Pinheiro, R.V.L., Truckenbrodt, W & Nogueira, A.C.R.(2012) Deformação das rochas siliciclásticas paleoproterozoicas do Grupo Arai como exemplo das reativações de falhas do embasamento, Serra do Tepequém, Roraima, norte do Brasil [Deformation of Paleoproterozoic siliciclastic rocks of the Arai Group as an example of basement fault reactivation, Serra do Tepequém, Roraima, northern Brazil]. *Revista Brasileira, Geociências* 42(4)785-798, www.sbgeo.org.br

A influência da erosividade da precipitação nas estimativas da perda anual de solos em culturas permanentes

The influence of rainfall erosivity on annual soil loss estimates in permanent crops

D. Duarte^{1*}, C. Pinheiro², S. L. Teixeira², G. Lima³, V. Nogueira⁴, R. Pereira⁴, M. Roboredo⁵, L. Pereira⁵, J. Coutinho⁵, J. Domínguez⁶, I. Alonso-Crespo⁶, S. Pereira^{3,7}

¹ Mestrado em Riscos Cidades e Ordenamento do Território, Dep. de Geografia, Faculdade de Letras da Universidade do Porto; Via Panorâmica, s/n, 4150-564 Porto Universidade do Porto, FLUP, Departamento de Geografia, Via Panorâmica s/n, 4150-564 Porto, Portugal; up202104747@up.pt

² Mestrado em Sistemas de Informação Geográfica e Ordenamento do Território, Dep. de Geografia, Faculdade de Letras da Universidade do Porto; Via Panorâmica, s/n, 4150-564 Porto Universidade do Porto, FLUP

³ Centro de Estudos em Geografia e Ordenamento do Território, Faculdade de Letras da Universidade do Porto; Via Panorâmica, s/n, 4150-564 Porto

⁴ GreenUPorto – Centro de Investigação em Produção Agroalimentar Sustentável/INOV4Agro, Departamento de Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, Rua do Campo Alegre s/n 4169-007 Porto, Portugal

⁵ Centro de Investigação e Tecnologias Agroambientais e Biológicas (CITAB), Institute for Innovation, Capacity Building and Sustainability of Agri-Food Production (Inov4Agro), UTAD, 5000-801 Vila Real

⁶ Departamento de Ecoloxía, Grupo de Ecoloxía Animal (GEA), Universidade de Vigo, 36310 Vigo

⁷ Centro de Estudos Geográficos, IGOT, Universidade de Lisboa; Rua Branca Edmée Marques, edifício IGOT. 1600-276, Lisboa

RESUMO

O estudo compara diferentes metodologias de cálculo da erosividade da precipitação (Fator R) e o seu impacto na estimativa da perda anual de solo em áreas de vinha e de olival no Norte de Portugal e na Galiza. Utilizando a RUSLE, compararam-se as estimativas do Fator R baseadas no ERA5-Land, no E-OBS e em Panagos (2015). Os resultados indicam que a escolha da base de dados de precipitação altera as estimativas do Fator R e da perda anual de solos. Enquanto as reanálises subestimam a erosão nas áreas experimentais portuguesas, projetam perdas críticas na Galiza ($>60 \text{ t ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$), reforçando a necessidade de validação com dados locais de observação.

Palavras-chave: *Erosividade da precipitação, RUSLE, culturas permanentes.*

Keywords: *Rainfall erosivity, RUSLE, permanent crops.*

1. INTRODUÇÃO

A erosividade da precipitação “refere-se à capacidade intrínseca da precipitação de causar erosão do solo”, sendo um dos processos de degradação do solo mais importantes devido à erosão provocada pela força da água (Morgan, 2005). A erosividade da precipitação (fator R) na Equação Universal de Perda de Solos Revista (RUSLE) representa o potencial médio da precipitação para causar erosão do solo, considerando a intensidade, a duração e o volume das chuvas. A Equação Universal de Perda de Solos (USLE) é definida como “um modelo de erosão concebido para prever as perdas médias de solo a longo prazo em escoamento de áreas de campo específicas em sistemas de cultivo e gestão especificados” (Wischmeier e Smith, 1978). A RUSLE introduz melhorias tecnológicas significativas,

substituindo os cálculos manuais por programas informáticos capazes de processar algoritmos e modelos mais complexos e precisos (Renard et al.,1997).

A RUSLE é definida como $E = R.K.LS.C.P.$, em que E representa a perda média anual de solo ($t\ ha^{-1}\ y^{-1}$), influenciada pelos fatores de erosividade da chuva (R) ($MJ\cdot mm\cdot ha^{-1}\cdot h^{-1}\cdot ano^{-1}$), erodibilidade do solo (K) ($t\ ha^{-1}\ ha^{-1}\ MJ^{-1}\ mm^{-1}$), comprimento e inclinação da vertente (LS), cobertura do solo (C) e práticas de conservação (P) (adimensionais). Segundo Panagos (2015), os valores médios da erosividade da precipitação para a área de estudo do Norte de Portugal e da Galiza (Figura 1) encontram-se compreendidos entre 340 e $>1300\ MJ\cdot mm\cdot ha^{-1}\cdot h^{-1}\cdot ano^{-1}$.

Neste trabalho, avalia-se a influência de diferentes fontes de dados de precipitação no cálculo da erosividade da precipitação (R) e os seus impactos nas estimativas da perda anual de solos em áreas de vinha e de olival localizadas no Norte de Portugal e na Galiza. A área de estudo corresponde ao Laboratório-Vivo 1 do projeto LivingSoiLL no qual se localizam 19 áreas experimentais (Figura 1), incluídas em explorações vitivinícolas e olivícolas.

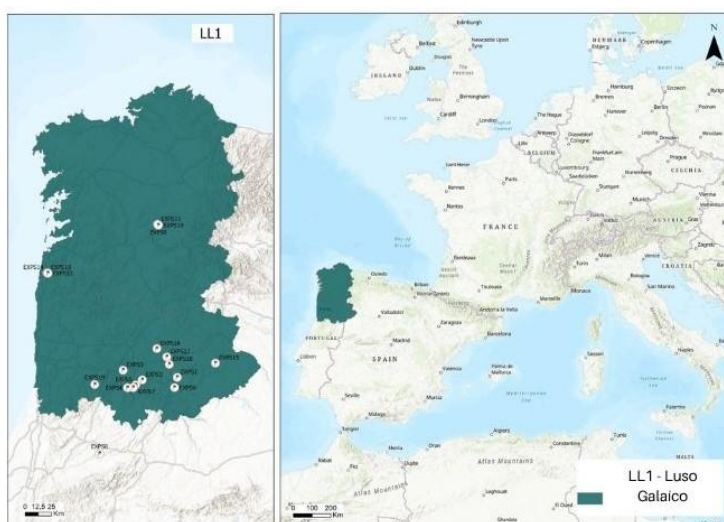


Figura 1. Laboratório-Vivo 1 e respetivas áreas experimentais

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia utilizada para o cálculo do Fator R tem por base a equação da RUSLE; para isso, foram utilizados dados diários correspondentes aos valores de precipitação do ERA5-Land (ECMWF, 2019; Muñoz Sabater et al., 2021) e do E-OBS (ECA&D - versão 30, 2025; Cornes et al., 2018), compreendidos num período de 30 anos (1995-2024), e o R médio do Panagos et al. (2015) que utiliza vários períodos de dados com diferentes séries.

Os dados de precipitação são segmentados em eventos, com pelo menos um dia seco entre eles. Para cada evento, a energia cinética é calculada pela fórmula de Brown e Foster (1987), assumindo-se uma distribuição uniforme da precipitação ao longo de 24 horas. Um evento é considerado erosivo se a precipitação total for $\geq 12,7\ mm$, ou se a sua intensidade máxima em 30 minutos (I_{30}) for $\geq 25,4\ mm\cdot h^{-1}$ (Renard et al.,1997). Para eventos erosivos, $EI_{30} = (\sum e_r \cdot v_r) \cdot I_{30}$; caso contrário, $EI_{30} = 0$. Por se tratar de uma série diária, a intensidade máxima em 30 minutos (I_{30}) é estimada através de uma relação empírica calibrada $I_{30} = \alpha P_{event}^{\beta}$, utilizando os parâmetros $\alpha = 1, \beta = 0,5$. O fator R resulta do somatório dos índices de EI_{30} de todos os eventos ocorridos num ano civil. O valor médio multianual de R é obtido pela média dos valores anuais de R do período de 30 anos analisado. Para estimar a incerteza do R médio, calculam-se intervalos de confiança de 95% pelo método do *bootstrap* (técnica de reamostragem), com 2000 reamostragens ao nível anual.

O Fator K (erodibilidade do solo) foi determinado para cada área experimental (EXPS) com base na fórmula de Wischmeier e Smith (1978). Os parâmetros de percentagem de areia, silte, argila e matéria orgânica, integrando-se ainda os valores de estrutura(s) e permeabilidade(p) de cada classe textural, foram determinados com base na amostragem de solos nos EXPS e na análise laboratorial, realizadas na primavera de 2025. O fator LS reflete o impacto da topografia na erosão, combinando o comprimento (L) e a inclinação (S) da vertente (Wischmeier e Smith, 1978). O LS foi calculado com o algoritmo de Desmet e Govers (1996) a partir de um MDT LiDAR de 0,5 m (DGT, 2025), permitindo a captura da microtopografia detalhada das parcelas. O Fator C resultou de uma classificação supervisionada de imagens de satélite e de ortomosaico de drone, segmentando a área em três classes: cultura permanente, solo nu e vegetação herbácea. A cada categoria foi atribuído um coeficiente de cobertura com base nos valores de referência de Panagos et al. (2015).

Finalmente, o Fator P (Práticas de Conservação) foi definido por meio de inquéritos locais que identificaram intervenções como cultivo em curvas de nível (*contouring*), muros de pedra (*stone walls*) e margens vegetadas (*grass margins*). A quantificação seguiu os coeficientes de Panagos et al. (2015), assegurando a coerência metodológica do modelo da RUSLE.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise comparativa da erosividade (fator R) revela uma correlação limitada entre as reanálises e o modelo de Panagos et al. (2015) ($R^2 = 0,29$), marcada por um erro sistemático considerável (RMSE: 442,9; Bias: -210,0) (Figura 2). De forma geral, o ERA5-Land (ECMWF, 2019; Muñoz Sabater et al., 2021) e o E-OBS (ECA&D - versão XX, 2025; Cornes et al., 2018) tendem a subestimar o potencial erosivo na maioria dos pontos (EXPS 1 a 11), em que os valores de referência são consistentemente superiores. Contudo, esta tendência inverte-se em áreas específicas, como no EXPS 12, onde o ERA5-Land (ECMWF, 2019; Muñoz Sabater et al., 2021) projeta uma erosividade muito superior à de Panagos et al. (2015). Esta divergência sugere que os modelos diários captam picos de intensidade e eventos extremos que tendem a ser suavizados nos modelos estatísticos.

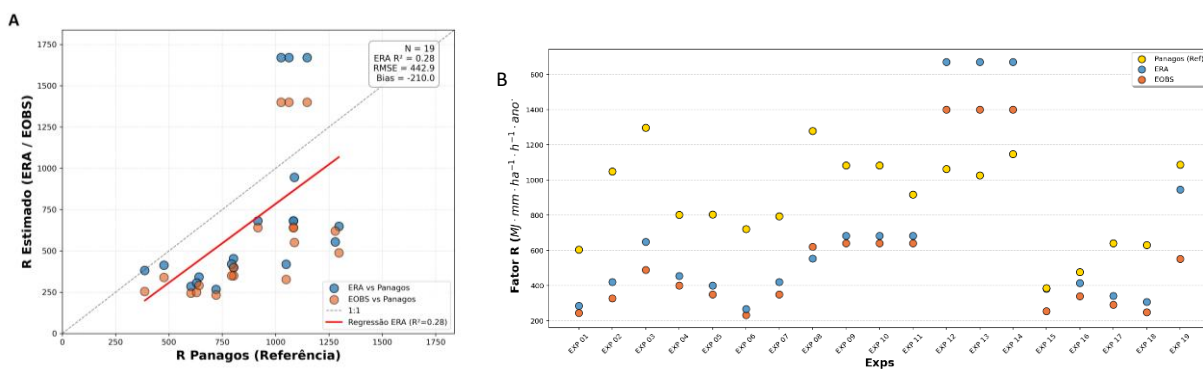


Figura 2. Comparação das estimativas de erosividade (R) nas áreas experimentais (EXPS) do Living Lab 1.

Esta incerteza no fator R propaga-se e amplifica-se na estimativa da perda anual de solo (E). Enquanto na primeira metade dos EXPS o diagnóstico baseado em reanálises resulta em valores inferiores aos do referencial, as estimativas invertem-se nos EXPS 13 a 19 (Figura 3). Nestas parcelas de maior vulnerabilidade, o ERA5 e o E-OBS projetam perdas de solo elevadas, ultrapassando os $60\ t\ ha^{-1}\ yr^{-1}$ (valor de referência). Em suma, os resultados demonstram que a escolha da fonte de dados de precipitação pode duplicar ou reduzir significativamente a perda anual de solo estimada. Esta discrepância sublinha a necessidade de validação local, uma vez que a dependência exclusiva de

reanálises sem calibração pode levar a erros graves, mascarando a degradação em certas zonas ou sobrestimando a necessidade de intervenção noutras.

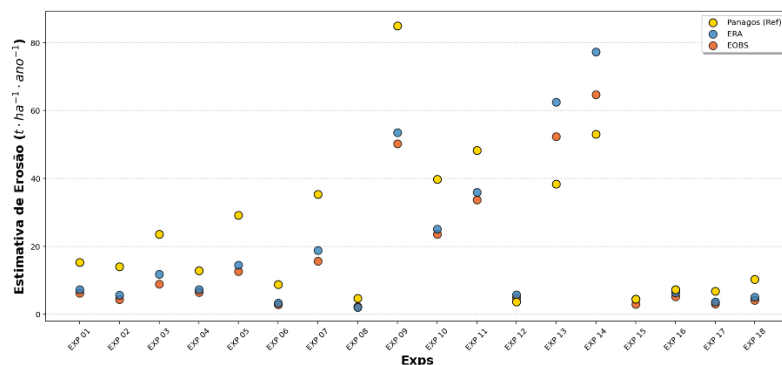


Figura 3. Comparação das estimativas de perda anual de solos (E) para os experimentais (EXPS) do Living Lab 1.

Agradecimentos

Este trabalho foi financiado pelo projeto LivingSoiLL “Healthy Soil to Permanent Crops Living Labs”, Horizonte Europa financiado pela Comissão Europeia ao abrigo do Grant Agreement 101157502 no âmbito da Missão da UE “A Soil Deal for Europe”. Este trabalho foi financiado por fundos nacionais através da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P., no âmbito do projeto UID/04084 – Centro de Estudos de Geografia e Ordenamento do Território.

Referências

- Brown, L. C., & Foster, G. R. (1987). Storm erosivity using idealized intensity distributions. *Transactions of the ASAE*, 30(2), 379-386.
- Cornes, R. C., van der Schrier, G., van den Besselaar, E. J. M., & Jones, P. D. (2018). An ensemble version of the E-OBS temperature and precipitation data sets. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123, 9391–9409.
- Desmet, P.; Govers, G. Comment on ‘Modelling topographic potential for erosion and deposition using GIS’. *Int. J. Geogr. Inf. Sci.* 1997, 11, 603–610.
- ECMWF. (2019). ERA5-Land reanalysis data. Copernicus Climate Data Store (CDS).
- ECA&D. (2026). E-OBS: European gridded observational dataset (versão 30e). Copernicus Climate Change Service (C3S).
- Morgan, R. P. C. (2005). *Soil erosion and conservation*. (3.ª ed.). Blackwell Publishing.
- Muñoz Sabater, J. et al. (2021). ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth System Science Data*, 13, 4349–4383.
- Panagos, P., Borrelli, P., Meusburger, K., Yu, B., Klik, A., Limnes, K. J., ... & Ballabio, C. (2015). Rainfall erosivity in Europe. *Science of the Total Environment*, 511, 801-814.
- Panagos, P., Borrelli, P., Meusburger, K., van der Zanden, E., Poesen, J., Alewell, C.: Modelling the effect of support practices (P-factor) on the reduction of soil erosion by water at European scale, *Environmental Science & Policy*, 51, 23-34, 2015d.
- Panagos, P., Borrelli, P., Meusburger, K., Alewell, C., Lugatoa, E., Montanarella, L.: Estimating the soil erosion cover-management factor at the European Scale, *Land Use Policy* 48, 38–50, 2015c..
- Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., McCool, D. K., & Yoder, D. C. (Coords.). (1997). *Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*. U. S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service.
- Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning*. U. S. Department of Agriculture.

Evento de instabilidade de vertentes de fevereiro de 2026 na Área Metropolitana de Lisboa e no Oeste: análise preliminar

Slope instability event of February 2026 in the Lisbon Metropolitan Area and Western Portugal: a preliminary analysis

J. L. Zêzere^{1,2*}, S. C. Oliveira^{1,2}, R. Melo^{1,2}, A. N. Silva^{1,2}, R. A. C. Garcia^{1,2}, C. Mora^{1,2}, H. Egas³, P. P. Santos^{1,2}, G. Vieira^{1,2}

¹ Centro de Estudos Geográficos - Instituto de Geografia e Ordenamento do Território, Universidade de Lisboa; Lisboa, Portugal

² Laboratório Associado TERRA; Lisboa, Portugal

³ CEMADEN – Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais, São José Dos Campos, São Paulo, Brasil

* zezere@edu.ulisboa.pt

RESUMO

O evento de instabilidade de vertentes ocorrido em fevereiro de 2026 na Área Metropolitana de Lisboa e no Oeste destaca-se pela sua excecionalidade na distribuição espacial e na precipitação desencadeante, por comparação com os episódios históricos registados na região. Os movimentos de vertente afetaram uma vasta área, com maior concentração nos municípios de Alenquer e Arruda dos Vinhos. A análise preliminar evidencia o controlo da litologia na predisposição à instabilidade.

Palavras-chave: *Evento de 2026; instabilidade de vertentes; precipitação extrema; tipologia de movimentos*

Keywords: *2026 event; slope instability, extreme rainfall; landslide typology*

1. INTRODUÇÃO

A Área Metropolitana de Lisboa e o Oeste têm sido historicamente afetados por episódios de instabilidade de vertentes associados a episódios de precipitação intensa e concentrada e períodos de precipitação abundante e mais prolongada no tempo (Zêzere et al., 2005). O evento de instabilidade ocorrido em fevereiro de 2026 insere-se no segundo contexto de situação desencadeante e constitui um caso excecional, pela elevada magnitude e expressão territorial. Este trabalho apresenta uma análise preliminar deste evento de instabilidade, com o objetivo de caracterizar a sua distribuição espacial, identificar os principais fatores de predisposição associados, analisar as condições de precipitação desencadeante e descrever a tipologia dos movimentos de vertente ocorridos.

2. DADOS E MÉTODOS

A análise efetuada baseou-se na integração de diferentes fontes de informação e metodologias, combinando a recolha documental, o trabalho de campo, a aquisição de dados de elevada resolução e a análise de dados meteorológicos.

Numa primeira fase, procedeu-se à recolha sistemática de registos de instabilidade de vertente reportados na comunicação social escrita, complementada com informação obtida junto das câmaras municipais dos municípios afetados, permitindo identificar datas e a localização de algumas ocorrências. O trabalho de campo constituiu, contudo, a base fundamental do estudo, tendo permitido a identificação, caracterização e cartografia detalhada dos movimentos de vertente, bem como a validação da informação previamente recolhida.

Em áreas selecionadas, foram realizados levantamentos com recurso a drone, com o objetivo de adquirir imagens de muito elevada resolução. A partir destes dados foram produzidos modelos digitais de superfície de elevada precisão e ortomosaicos, que permitiram uma análise mais detalhada da morfologia dos movimentos e das áreas envolventes.

Paralelamente, foi efetuada a análise da precipitação diária registada em 42 postos udométricos pertencentes ao Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA), à Área Metropolitana de Lisboa (AML) e à Agência Portuguesa do Ambiente (APA). Estes dados permitiram caracterizar o episódio pluviométrico associado ao evento, nomeadamente em termos de quantidade, duração e distribuição espacial.

Importa salientar que, nesta fase, não se encontra ainda disponível cobertura sistemática de fotografia aérea ou de imagens de satélite de elevada resolução, para a área afetada, a qual permitirá, numa fase posterior, a elaboração de um inventário exaustivo e consistente dos movimentos de vertente ocorridos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O evento de instabilidade de vertentes ocorrido em fevereiro de 2026 na Área Metropolitana de Lisboa e no Oeste destaca-se pela sua excecionalidade, quer na distribuição espacial, quer nas características da precipitação desencadeante, quando comparado com os episódios históricos de instabilidade geomorfológica registados na região. Os movimentos de vertente ocorreram entre 2 e 13 de fevereiro (Fig.1) e estarão associados a uma sucessão de dias com precipitação persistente iniciada a 21 de janeiro. No período de 24 dias, entre 21 de janeiro e 13 de fevereiro, registaram-se 491 mm de precipitação em Loures. Refira-se que este valor nunca foi atingido, para um período equivalente, no posto udométrico de referência de S. Julião do Tojal (situado a 4,5 km de Loures), em qualquer dos 25 eventos de instabilidade de vertentes registados na Região a Norte de Lisboa, desde 1958 (Zêzere et al., 2015). Adicionalmente, o episódio de precipitação iniciado em 21 de janeiro foi antecedido por 683 mm acumulados desde o início de setembro, com dois picos principais no final de outubro e em meados de novembro, o que reforça a excecionalidade do ano climatológico de 2025-26.

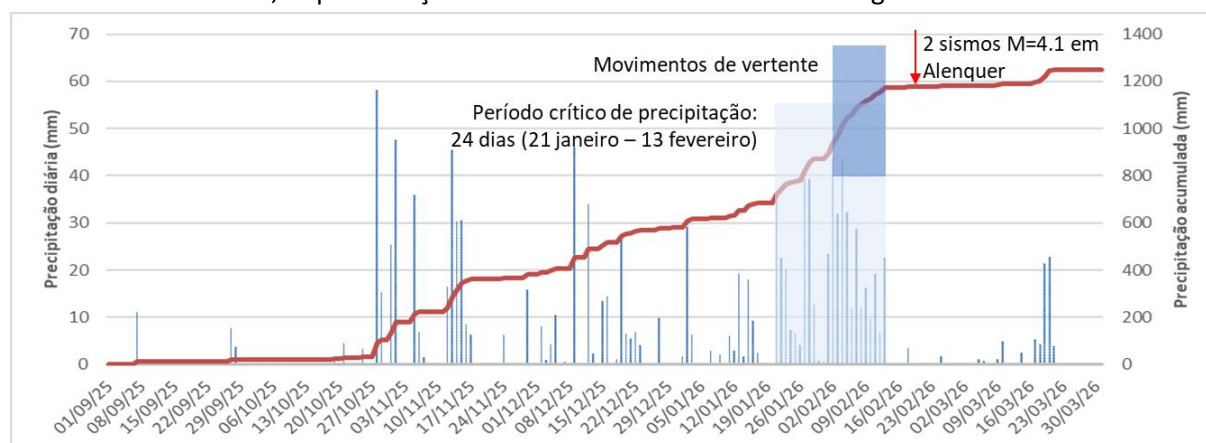


Figura 1. Precipitação diária e acumulada em Loures no período antecedente ao evento de movimentos de vertente de fevereiro de 2026

A Figura 2 representa a distribuição espacial da precipitação acumulada entre 21 de janeiro e 13 de fevereiro, evidenciando uma área extensa que recebeu mais de 350 mm, com máximos registados nos setores Lisboa–Almada, a sul, e Rio Maior, a norte.

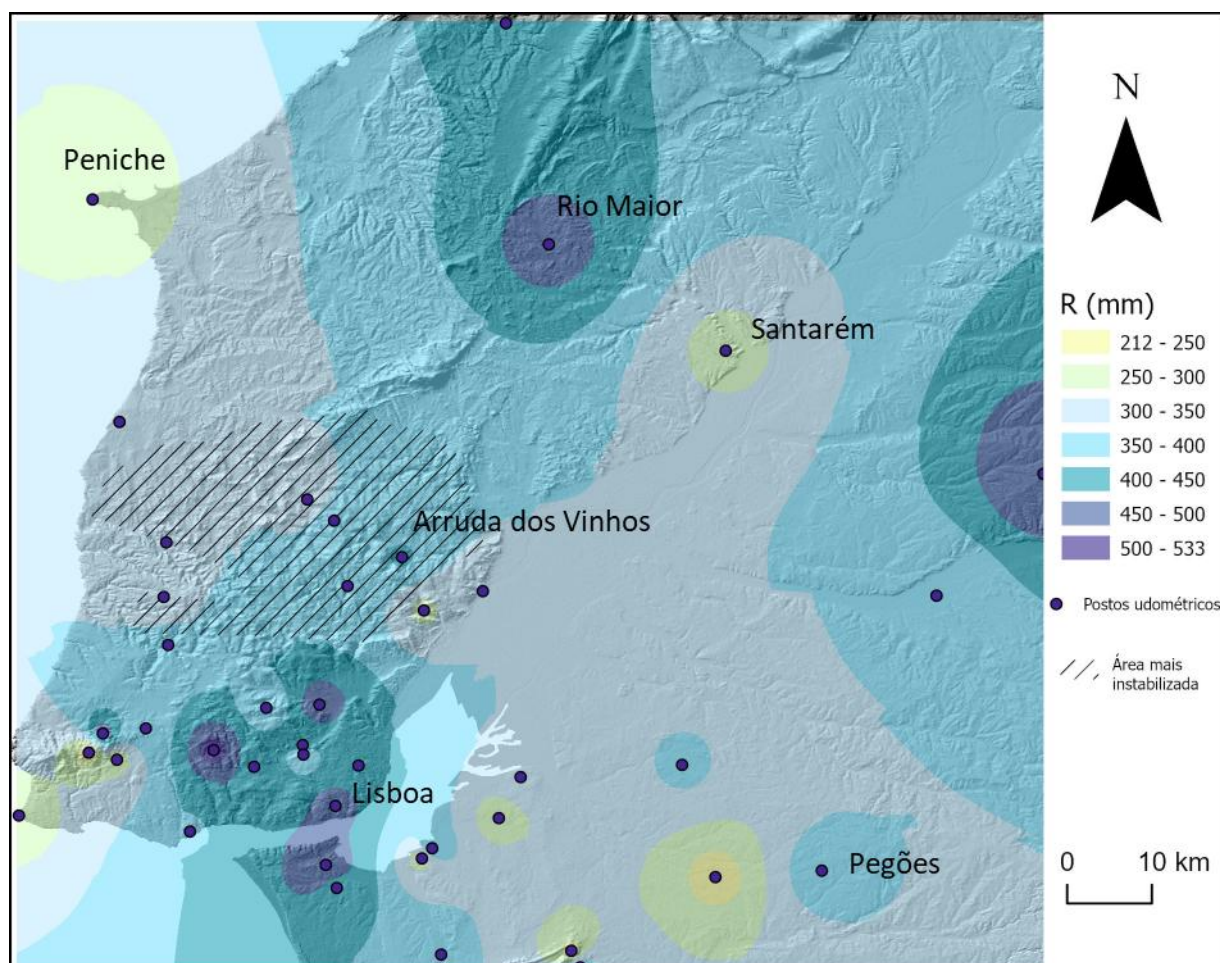


Figura 2. Distribuição espacial da precipitação acumulada entre 21 de janeiro e 13 de fevereiro de 2026 na região de Lisboa, Oeste e Baixo Vale do Tejo (Fontes dos dados: IPMA, AML, APA-SNIRH).

Os movimentos de vertente afetaram uma vasta área, com maior concentração nos municípios de Alenquer e Arruda dos Vinhos. A análise preliminar evidencia o papel dominante da litologia na predisposição à instabilidade, com particular destaque para as formações argilosas e margosas do Jurássico superior. Em comparação, o declive terá desempenhado um papel secundário. De facto, muitos deslizamentos rotacionais ocorreram em vertentes com declives inferiores a 15°, condição que favorece a infiltração da água e a progressiva saturação dos terrenos até ao limiar de rutura.

O evento caracteriza-se por uma elevada diversidade tipológica dos movimentos de vertente (Fig. 3). Os deslizamentos rotacionais são claramente dominantes, apresentando superfícies de rutura curvas (*spoon-shaped*) ou aproximadamente cilíndricas. Em vertentes de fraco declive, estes deslizamentos tendem a apresentar ruturas confinadas, enquanto, em vertentes mais dinâmicas, observam-se evidências de evolução retrogressiva. Em menor número, identificam-se deslizamentos translacionais e roto-translacionais, escoadas de detritos e lamacentas, avalanchas de detritos e desabamentos. Alguns desabamentos ocorreram em fase mais tardia do evento, nomeadamente a 19 de fevereiro, associados a dois sismos de magnitude 4,1, com epicentro próximo de Alenquer.

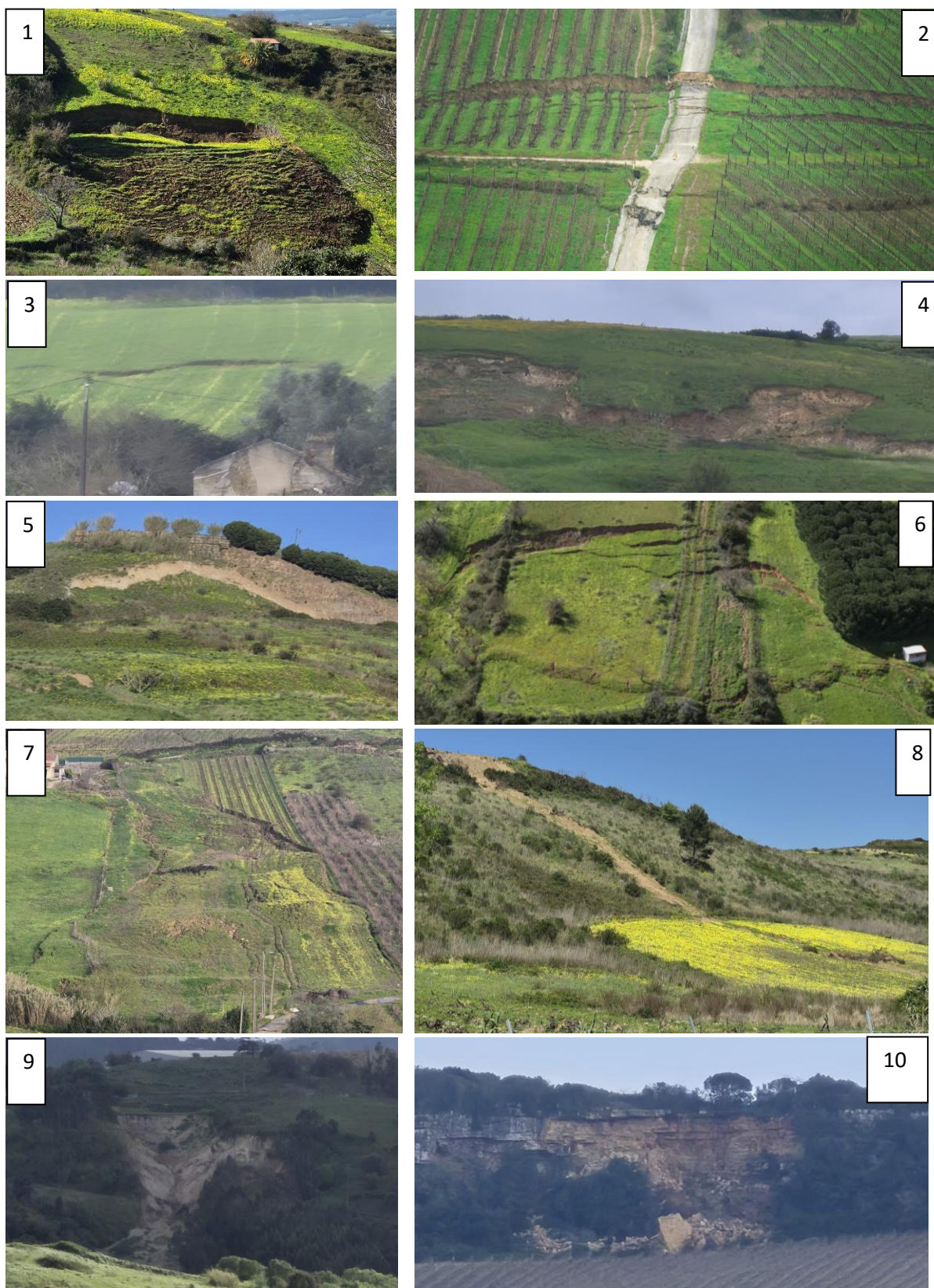


Figura 3. Tipologia de movimentos de vertente ocorridos no Oeste e na Área Metropolitana de Lisboa no evento de 2026. 1- 4 - Deslizamentos rotacionais, com rutura *spoon shaped* (1), com rutura cilíndrica (2), confinado (3), retrogressivo (4); 5 – deslizamento translacional; 6 – deslizamentos roto-translacional; 7 – escoada lamacenta; 8 – escoada detrítica; 9 – avalanche de detritos; 10 – desabamento.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O evento de instabilidade de vertentes de fevereiro de 2026 na Área Metropolitana de Lisboa e no Oeste destaca-se pela sua elevada magnitude e expressão territorial, associadas a um episódio de precipitação excecional, quer em termos de duração, quer de quantidade acumulada. A análise preliminar evidencia o papel dominante da litologia na predisposição à instabilidade, em particular das formações argilosas e margosas, favoráveis à ocorrência de deslizamentos rotacionais. O declive terá tido uma influência secundária em muitos dos movimentos observados.

A futura disponibilidade de cobertura sistemática de fotografia aérea ou imagem de satélite de elevada resolução, permitirá aprofundar esta análise e consolidar o inventário dos movimentos de vertente ocorridos.

Agradecimentos

Este trabalho foi apoiado por fundos públicos portugueses através da FCT - Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P, pela Unidade de Investigação UID/00295/2025 (DOI <https://doi.org/10.54499/UID/PRR/00295/2025>).

JLZ, SCO, RM, RACG e PPS foram apoiados pelo projeto EGMS RASTOOL-DoS: European Ground Motion Risk Assessment Tools - Downstream Service (UCPM-2024-KAPP-PP – 101193210).

Os dados de precipitação foram cedidos pelo Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA), Área Metropolitana de Lisboa (AML) e pela Agência Portuguesa do Ambiente (APA).

As Câmaras Municipais de Alenquer, Arruda dos Vinhos, Mafra e Torres Vedras disponibilizaram inventários de movimentos de vertente ocorridos nos respetivos territórios.

Referências

- Zêzere, J. L., Trigo, R. M., & Trigo, I. F. (2005). Shallow and deep landslides induced by rainfall in the Lisbon region (Portugal): assessment of relationships with the North Atlantic Oscillation. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 5(3), 331-344.
- Zêzere, J. L., Vaz, T., Pereira, S., Oliveira, S. C., Marques, R., & Garcia, R. A. (2015). Rainfall thresholds for landslide activity in Portugal: a state of the art. *Environmental Earth Sciences*, 73(6), 2917-2936.

Modelação da Erosão Hídrica em vinhas de encosta na Região Demarcada do Douro: Análise Comparativa Pré e Pós-Intervenção na Rede de Drenagem

Modelling Water Erosion on slope vineyards in the Douro Demarcated Region: A Comparative Analysis of the Drainage Network Before and After Intervention

S. Pereira^{1,2}, S. L. Teixeira³, C. Bateira⁴, C. Pinheiro³, D. Duarte³, J. Manso⁵, S. Correia⁵, A.R. Ferreira⁵, A. Graça⁵

¹ Centro de Estudos em Geografia e Ordenamento do Território, Faculdade de Letras da Universidade do Porto; Via Panorâmica, s/n, 4150-564 Porto; sspereira@letras.up.pt

² Centro de Estudos Geográficos, IGOT, Universidade de Lisboa; Rua Branca Edmée Marques, edifício IGOT. 1600-276, Lisboa;

³ Faculdade de Letras da Universidade do Porto; Via Panorâmica, s/n, 4150-564 Porto;

⁴ Riskam, IGOT, ULisboa/FLUP, UPorto; Via Panorâmica, s/n, 4150-564 Porto;

⁵ Sogrape Vinhos S.A., Rua 5 de Outubro, 4527, 4430-809 Avintes, Portugal

RESUMO

Este trabalho compara os resultados da modelação da erosão hídrica de solos realizada com o SIMWE, após intervenção nas estruturas de drenagem numa área vitícola de encosta com patamares de dois bardos e micropatamares.

A metodologia inclui quatro fases principais: i) modelação da erosão hídrica com a topografia de 2022; ii) intervenção nas estruturas de drenagem; iii) modelação da erosão hídrica com a topografia atual; iv) comparação entre os modelos. A reavaliação do processo erosivo é um passo técnico diferenciador para quantificar o impacto nos processos erosivos decorrentes das modificações efetuadas nas estruturas de drenagem.

Palavras-chave: SIMWE, Erosão hídrica, Escoamento superficial, Viticultura de encosta, Região Demarcada do Douro

Keywords: SIMWE, Water erosion, Surface runoff, slope vineyards, Douro Demarcated Region

1. INTRODUÇÃO

A Região Demarcada do Douro (RDD), em Portugal, é uma região de viticultura de montanha que apresenta grandes desafios, quer em termos de operações vitícolas, quer na adequação de castas e na seleção de locais para a elaboração de distintos tipos de vinho. A viticultura do Douro é única, oferecendo diferentes microclimas devido à sua orografia acidentada e aos declives das encostas mais ou menos pronunciados.

A sistematização do terreno e da vinha em regiões de montanha, nomeadamente na RDD, exige uma gestão rigorosa do escoamento superficial, fundamental para a preservação do solo. A elevada declividade e a influência antrópica do terreno potenciam processos de erosão hídrica severa, resultando na diminuição da saúde do solo, na deposição indesejada de sedimentos em linhas de água e em infraestruturas viárias e na redução da saúde do solo (Prosdociimi et al., 2016; García-Ruiz et al., 2013). Recentemente, diversos estudos sobre dinâmicas hidrogeomorfológicas têm surgido por meio da aplicação de técnicas de aquisição de dados de alta resolução em áreas de terraços e patamares

(Fernandes J. et al., 2017). A mitigação da erosão hídrica de solos nesta região exige soluções que conciliem a conservação do solo, ajustada às características geográficas singulares, com a viabilidade operacional da atividade agrícola mecanizada (Garcia-Ruiz, 2013).

Neste contexto, o presente trabalho compara os resultados da modelação da erosão hídrica de solos, realizada com o SIMWE (SIMulation of Water Erosion), na topografia pré-alteração do sistema de drenagem (em 2022) e na topografia pós-alteração nas estruturas de drenagem (em 2024).

2. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo localiza-se na sub-região do Cima Corgo, em Valença do Douro (41°10'05.3"N 7°33'18.5"W), no município de Tabuaço, com altitudes entre 80 e 300 m e declives médios das vertentes superiores a 13 graus. Em termos geológicos, a área de estudo localiza-se nas rochas metamórficas da Bacia do Douro de idade câmbria, maioritariamente na Formação de Bateiras e na Formação do Pinhão. A área de estudo caracteriza-se por um clima temperado, com verão quente e seco (Csa), e por eventos extremos de precipitação diária e horária.

As vertentes encontram-se organizadas segundo diferentes sistemas de implantação da vinha, designadamente: (1) patamares de dois bardos, (2) micropatamares e (3) socalcos de alta precisão com elevada densidade de plantação, sendo toda a produção conduzida em modo de Produção Integrada, de acordo com as diretrizes de Produção Integrada para uvas do IOBC.

3. METODOLOGIA

Procurando compreender, intervir e avaliar a dinâmica da erosão hídrica após a alteração das estruturas de drenagem a metodologia foi estruturada em quatro fases principais (Figura 1): i) diagnóstico e modelação de base física da erosão hídrica de solos com a topografia de 2022; ii) intervenção nas estruturas de drenagem; iii) modelação de base física da erosão hídrica de solos com a topografia atual; iv) comparação entre os dois modelos de erosão hídrica de solos.

Na Fase I, procedeu-se ao diagnóstico e à modelação da erosão hídrica de solos com o modelo SIMWE implementado no sistema de informação geográfica de código aberto GRASS GIS (versão 8.4.0). Nesta fase verificou-se o registo frequente de danos resultantes do escoamento superficial linear concentrado (sulcagem e ravinamento), sobretudo ao longo dos caminhos e de setores específicos das vinhas, com perdas de solo e de produção associadas. O modelo digital de terreno (MDT) utilizado foi gerado a partir de dados altimétricos provenientes de um voo, com resolução espacial de 60 cm. O MDT é essencial para o funcionamento dos módulos do SIMWE (r.sim.water e r.sim.sediment), fornecendo os dados de entrada necessários para avaliar a morfologia do terreno, permitindo a simulação do escoamento superficial da água, bem como dos processos de erosão, transporte e deposição de sedimentos decorrentes do escoamento laminar (Fernandes et al., 2017). Para a execução adequada desses módulos, foi necessário definir parâmetros como o excesso de precipitação (50 mm), a infiltração no solo (0,619 mm/h), o coeficiente de *Manning* (0.08, vinhas), a capacidade de transporte de sedimentos (0,001 s), coeficiente da capacidade de destacamento (0,001 s/m) e a tensão crítica de cisalhamento (0,5 Pa), tendo como base o trabalho de campo e referências bibliográficas (Batista et al., 2019; Fernandes et al., 2017).

Na Fase II, foram realizadas intervenções nas estruturas de drenagem, nos setores das vertentes identificados na fase anterior com maior caudal e fluxo de sedimentos. Nesta fase, foi realizado um dimensionamento estratégico de infraestruturas de drenagem para a recolha e o desvio da drenagem, de forma rápida, para os setores a jusante das vertentes e para fora das parcelas de vinha, reduzindo o caudal e o escoamento acumulado nos setores onde se geravam danos por ação da erosão hídrica.

O sistema de drenagem foi concebido para não interromper a atividade agrícola (e.g., passagem de tratores), sendo constituído por desvios de escoamento superficial, grelhas para concentrar o escoamento superficial ao longo dos caminhos e conduzi-lo para setores mais a jusante, e caixas de concentração para maiores caudais de escoamento superficial, com uma armadilha para a retenção de sólidos e redução da velocidade do escoamento.

Na Fase III, realizou-se uma nova modelação da erosão hídrica de solos com o modelo SIMWE, com a topografia de 2024, pós-intervenção nas estruturas de drenagem e os mesmos parâmetros utilizados na Fase I. Neste caso, utilizou-se a nuvem de pontos com informação altimétrica de LiDAR (DGT, 2025), a partir da qual foi gerado um MDT com resolução espacial de 40 cm.

Na Fase IV realizou-se uma comparação entre os dois modelos de erosão hídrica de solos (descarga de água em m^3/s , fluxo de sedimentos em kg/ms e erosão/deposição em kg/ms) reclassificados, com recurso ao software Map Comparison Kit (<http://mck.riks.nl/software>).

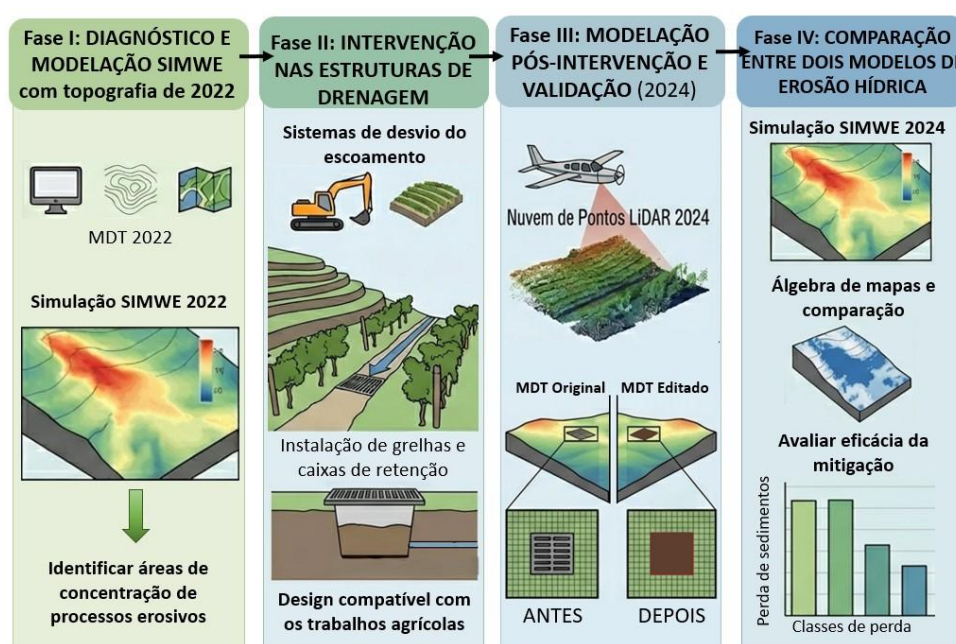


Figura 1. Esquema metodológico das fases do trabalho.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados do modelo SIMWE, realizado com a topografia de 2022, foram cruciais para a identificação dos pontos de concentração do escoamento superficial sob condições de precipitação extrema e dos setores de vertentes com transbordo e formação de processos de sulcagem e ravinamento. Este modelo contribuiu para o desenho e a implementação das estruturas de drenagem nos pontos críticos de escoamento, otimizando os custos de implementação e a área de intervenção. Durante a Fase III, em que se realizou a modelação da erosão hídrica pós-intervenção, identificamos um desafio de integridade topológica das células, correspondentes à localização das caixas e dos sistemas de drenagem. Por ser um sensor de varrimento de superfície, o LiDAR interpreta as grelhas metálicas e as coberturas das caixas de drenagem como barreiras físicas sólidas ou pequenas elevações no terreno. Em contrapartida o modelo SIMWE, processa o transporte hídrico com base no declive, sendo que estas infraestruturas não atuam na simulação como recetores artificiais da drenagem, onde o fluxo hídrico é desviado do sistema natural de drenagem, deixando por isso de seguir o seu fluxo para o interior da parcela. Para contornar esta limitação e replicar o comportamento hidrológico

observado *in situ*, realizou-se uma edição manual da altitude nas células com a localização exata das grelhas e caixas de drenagem, atribuindo-lhes valores de altitude artificialmente baixos. Esta técnica criou um "sumidouro digital" (*sink*). Ao encontrar estes pontos de cota rebaixada, o algoritmo do SIMWE interpreta uma queda abrupta no potencial gravitacional, forçando a convergência e o "desaparecimento" do fluxo superficial nesses pixéis, simulando com precisão a captura da água artificial pelo sistema de drenagem artificial e a sua remoção do balanço de escoamento da parcela. Esta correção é fundamental para garantir a eficácia das estruturas de drenagem na interrupção da dinâmica erosiva a jusante.

As alterações na drenagem resultaram na modificação da configuração e numa redução das áreas contributivas na área intervencionada. Em termos de resultados de descarga de água, verificou-se uma redução de 80% em relação ao valor médio entre 2022 e 2024. Em todos os parâmetros ligados ao transporte de sedimentos (capacidade, concentração e fluxo), registaram-se reduções de 53% a 74%, respetivamente. No parâmetro erosão/deposição (kg/ms), verificou-se uma variação percentual de 309,06% em relação ao valor médio dos processos de deposição, em comparação com os processos de erosão.

O esquema de trabalho demonstra que as medidas de controlo da erosão em áreas de vinha tornam-se mais eficazes quando guiadas por modelos preditivos e observações de campo. Além disso, a reavaliação do processo erosivo revela-se um passo técnico diferenciador que permite quantificar as melhorias introduzidas pelas modificações efetuadas nas estruturas de drenagem.

Dessa forma, estabelece-se um quadro metodológico que combina simulação, observação empírica e validação, assegurando a avaliação dos processos de erosão e das medidas de mitigação aplicadas.

Agradecimentos

Este trabalho foi financiado pelo projeto LivingSoiLL "Healthy Soil to Permanent Crops Living Labs", Horizonte Europa financiado pela Comissão Europeia ao abrigo do Grant Agreement 101157502 no âmbito da Missão da UE "A Soil Deal for Europe".

Este trabalho foi financiado por fundos nacionais através da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P., no âmbito do projeto UID/04084 – Centro de Estudos de Geografia e Ordenamento do Território.

Referências

- Batista, P. V. G., Davies, J., Silva, M. L. N., & Quinton, J. N. (2019). On the evaluation of soil erosion models: Are we doing enough? *Earth-Science Reviews*, 197, 102898. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.102898>
- Fernandes, J., Bateira, C., Soares, L., Faria, A., Oliveira, A., Hermenegildo, C., Moura, R., & Gonçalves, J. (2017). SIMWE model application on susceptibility analysis to bank gully erosion in Alto Douro Wine Region agricultural terraces. *Catena*, 153, 39–49. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.01.034>
- García-Ruiz, J. M., Nadal-Romero, E., Lana-Renault, N., & Beguería, S. (2013). Erosion in Mediterranean landscapes: Changes and future challenges. *Geomorphology*, 198, 20–36. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.05.023>
- Map Comparison Kit Website. (2026). Riks.nl. <http://mck.riks.nl/software>
- Prosdoci, M., Cerdá, A., & Tarolli, P. (2016). Soil water erosion on Mediterranean vineyards: A review. *Catena*. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.02.010>

Cartografia geomorfológica de ultra-alta resolução do movimento de vertente complexo de A-do-Mourão associado ao evento de fevereiro de 2026 na região de Lisboa

Ultra high-resolution geomorphological mapping of the complex slope movement of A-do-Mourão associated with the February 2026 event in the Lisbon region

R. Melo^{1,2 *}, J.L. Zêzere^{1,2}, S.C. Oliveira^{1,2}, A.N. Silva^{1,2}, R.A.C. Garcia^{1,2}, C. Mora^{1,2}, H. Egas³,
P.P. Santos^{1,2}, G. Vieira^{1,2}

¹ Centro de Estudos Geográficos - Instituto de Geografia e Ordenamento do Território, Universidade de Lisboa; Lisboa, Portugal

² Laboratório Associado TERRA; Lisboa, Portugal

³ CEMADEN – Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais, São José Dos Campos, São Paulo, Brasil

* raquel.melo@edu.ulisboa.pt

RESUMO

O presente trabalho visa a cartografia geomorfológica de alta resolução de um movimento de vertente complexo associado ao evento de fevereiro de 2026 na região de Lisboa. A abordagem integra aquisição de dados de ultra-alta resolução a partir de UAV (RTK), processamento fotogramétrico (SfM-MVS) e análise diferencial entre DSM/MDT derivados e MDT LiDAR pré-evento. Proceda-se à reconstrução 3D da morfologia, análise morfométrica e interpretação da cinemática, enquadradas nas condições de precipitação desencadeante.

Palavras-chave: *cartografia geomorfológica; UAV; análise morfométrica; movimentos de vertente.*

Keywords: *geomorphological mapping; UAV; morphometric analysis; landslides.*

1. INTRODUÇÃO

O evento de instabilidade ocorrido em fevereiro de 2026 na região de Lisboa caracteriza-se pela sua elevada magnitude e ampla expressão espacial, estando associado a condições hidrometeorológicas excecionais, nomeadamente precipitação acumulada prolongada e persistente. Este contexto favoreceu a ativação e/ou reativação generalizada de movimentos de vertente de diferentes tipos. O presente trabalho tem como objetivo a cartografia geomorfológica detalhada do movimento de vertente complexo de A-do-Mourão, situado no município de Arruda dos Vinhos, no setor montante da sub-bacia da ribeira da Pipa, bacia hidrográfica do rio Trancão, e ocorrido a 4 de fevereiro de 2026. Adicionalmente, é apresentada a reconstrução da evolução morfodinâmica do movimento de vertente e a interpretação da sua cinemática.

2.DADOS E MÉTODOS

A metodologia baseia-se na integração de trabalho de campo com a aquisição de dados de ultra-alta resolução com recurso a veículo aéreo não tripulado (UAV), visando a cartografia geomorfológica de pormenor do movimento de vertente.

O levantamento aerofotogramétrico foi realizado com um UAV DJI Mavic 3 M equipado com sistema RTK, com correção em tempo real através da rede ReNEP (estação Arruda dos Vinhos), sendo complementado por pontos de controlo no terreno (GCPs) adquiridos com GNSS. O processamento fotogramétrico foi efetuado com o software Pix4Dmapper 10.1, com base em algoritmos Structure-from-Motion (SfM) e Multi-View Stereo (MVS), permitindo a geração de ortomosaico, modelo digital de superfície (DSM), nuvem de pontos densa e modelo tridimensional texturizado. Os modelos matriciais foram obtidos com resolução de 5 cm/px.

A cartografia geomorfológica de pormenor será realizada com base na interpretação integrada do ortomosaico, dos modelos digitais e da observação de campo, permitindo a identificação e delimitação dos principais elementos morfológicos do movimento, incluindo escarpa principal, superfícies de rutura secundárias, zonas de transporte e áreas de acumulação.

A partir da nuvem de pontos será derivado um modelo digital do terreno (MDT), mediante classificação e filtragem dos elementos não-terreno, sendo posteriormente comparado com o MDT LiDAR pré-evento disponibilizado pela Direção-Geral do Território. Esta abordagem é possível porque a vegetação é dominada por herbáceas e permitirá realizar análises diferenciais (DoD – Difference of DEMs), visando a aproximação das principais alterações topográficas associadas ao movimento.

Com base nesta informação, proceder-se-á à análise volumétrica dos materiais mobilizados e à caracterização morfométrica do movimento. A interpretação da cinemática será suportada pela análise geomorfológica detalhada.

3.RESULTADOS PRELIMINARES

A ortoimagem de ultra-alta resolução obtida por UAV a 28 de março de 2026, juntamente com o trabalho de campo, permitiu uma primeira identificação e delimitação preliminar do movimento de vertente, evidenciando uma área afetada de aproximadamente 12 500 m², um comprimento de cerca de 300 m e uma largura máxima de aproximadamente 40 m (Fig. 1). O movimento desenvolve-se entre as cotas de 223 m e 272 m, revelando uma morfologia alongada, com uma cabeceira bem definida e uma zona de transporte que se prolonga ao longo da vertente até à zona de acumulação distal. No setor direito da cabeceira, observam-se irregularidades morfológicas que conferem ao movimento uma configuração pouco típica, sugerindo a possível interação de múltiplos processos ou a existência de heterogeneidades locais condicionantes da rutura.

A análise preliminar sugere tratar-se de um movimento de vertente complexo, possivelmente resultante da combinação de diferentes mecanismos de instabilidade, que provocou a destruição de um troço de estrada. No entanto, esta delimitação tem carácter preliminar, sendo a cartografia geomorfológica de pormenor e a análise morfodinâmica desenvolvidas numa fase subsequente, com base na integração dos modelos digitais de ultra-alta resolução e do trabalho de campo.



Figura 1. Ortoimagem de alta resolução do movimento de vertente complexo de A-do-Mourão obtida por UAV, com delimitação preliminar da área afetada. É visível a extensão do movimento ao longo da vertente e a destruição de um troço de estrada. No canto superior direito apresenta-se uma imagem da área em estudo em 2024, anterior à ocorrência do evento.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A ortoimagem, o modelo digital de superfície e a nuvem de pontos de ultra-alta resolução obtidos por UAV revelam-se particularmente relevantes para a identificação e discriminação de diferentes mecanismos de instabilidade em movimentos de vertente complexos, contribuindo para a avaliação da suscetibilidade e para o apoio ao ordenamento do território e gestão do risco.

Agradecimentos

Este trabalho foi apoiado por fundos públicos portugueses através da FCT - Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P, pela Unidade de Investigação UID/00295/2025 (DOI <https://doi.org/10.54499/UID/PRR/00295/2025>).

JLZ, SCO, RM, RACG e PPS foram apoiados pelo projeto EGMS RASTOOL-DoS: European Ground Motion Risk Assessment Tools - Downstream Service (UCPM-2024-KAPP-PP – 101193210).

Mapeamento detalhado de movimentos de vertente desencadeados durante o evento de fevereiro de 2026 com recurso a UAV: o estudo de caso do Lapão (Arruda dos Vinhos)

Detailed UAV-based landslide mapping of the February 2026 rainfall-triggered landslide event: The Lapão (Arruda dos Vinhos) case study

S.C. Oliveira^{1,2 *}, J.L. Zêzere^{1,2}, R. Melo^{1,2}, R.A.C. Garcia^{1,2}, C. Mora^{1,2}, A.N. Silva^{1,2}, H. Egas³,
P.P. Santos^{1,2}, G. Vieira^{1,2}

¹ Centro de Estudos Geográficos - Instituto de Geografia e Ordenamento do Território, Universidade de Lisboa; Lisboa, Portugal

² Laboratório Associado TERRA; Lisboa, Portugal

³ CEMADEN – Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais, São José Dos Campos, São Paulo, Brasil

* cruzdeoliveira@edu.ulisboa.pt

RESUMO

A inventariação e a caracterização detalhada dos movimentos de vertente ocorridos durante o evento de instabilidade de fevereiro de 2026 na área de estudo do Lapão, Arruda dos Vinhos foram realizadas neste trabalho com recurso a um levantamento aerofotogramétrico de ultra-alta resolução com UAV, ao processamento das imagens com software fotogramétrico e à inventariação, caracterização geomorfológica e interpretação cinemática dos movimentos de vertente. A fotointerpretação preliminar do ortomosaico de ultra-alta resolução obtido com UAV permitiu a inventariação de 16 movimentos de vertente ocorridos em fevereiro de 2026 na área de estudo, com uma área total instabilizada de quase 180.000 m².

Palavras-chave: evento de fevereiro de 2026, UAV, cartografia geomorfológica; movimentos de vertente.

Keywords: February 2026 event, UAV, geomorphological mapping; landslides.

1. INTRODUÇÃO

O município de Arruda dos Vinhos registou um número significativo de estradas cortadas, danos em edifícios e desalojados por movimentos de vertente durante o evento de instabilidade regional, ocorrido em fevereiro de 2026. A precipitação persistente e prolongada desencadeou, de 3 para 4 de fevereiro e dias subsequentes, um conjunto de movimentos de vertente na área do Lapão (~1 km²), que afetaram um complexo de margas e argilas intercaladas por camadas de arenito (margas de Abadia, Zbyszewski e Assunção, 1965). Os movimentos de vertente destruíram a estrada do Lapão e provocaram danos graves a cerca de 10 edifícios.

Tendo em consideração a importância da inventariação e da caracterização deste evento de instabilidade regional, importa salientar que o reconhecimento de movimentos de vertente em fotografias aéreas pode ser condicionado por um conjunto alargado de fatores que dificultam a fotointerpretação e que se relacionam, por exemplo, com as propriedades fotográficas e data das imagens ou fatores morfológicos, vegetação/uso do solo, entre outros. Nesse sentido, e de forma a tentar ultrapassar estas possíveis limitações, o presente estudo tem como objetivo principal inventariar e caracterizar os movimentos de vertente associados ao evento de fevereiro de 2026 na área de estudo do Lapão, Arruda dos Vinhos, através de levantamentos aerofotogramétricos de ultra-alta resolução com UAV.

2. DADOS E MÉTODOS

A inventariação dos movimentos de vertente ocorridos durante o evento de instabilidade de fevereiro de 2026 na área de estudo do Lapão, Arruda dos Vinhos tem por base: (i) um levantamento aerofotogramétrico de ultra-alta resolução com UAV da área de estudo; (ii) o tratamento e processamento das imagens com software fotogramétrico para produção de produtos cartográficos e tridimensionais; (iii) a inventariação e caracterização espacial e interpretação cinemática dos movimentos de vertente desencadeados no evento de instabilidade regional.

A aquisição dos dados aerofotogramétricos foi efetuada com recurso a um VANT DJI Mavic 3M dotado de tecnologia de posicionamento RTK e de sincronização temporal. A aquisição das fotografias aéreas foi efetuada a 28 de março de 2026, e as correções de posicionamento em tempo real foram obtidas através de observações no Sistema de Referência ETRS89, na estação de Arruda dos Vinhos (ARRD), da rede RENE (Direção-Geral do Território). Para reforçar a precisão posicional, foram igualmente levantados pontos de controlo no terreno (GCPs) com equipamento Emlid RS3 RTK GNSS, provido de um sistema de compensação de inclinação do recetor.

Para o tratamento e processamento das imagens, recorreu-se ao software fotogramétrico Pix4Dmapper 10.1, para gerar um ortomosaico e um modelo digital de superfície, com uma resolução de 5 cm por pixel. Por último, foi produzido um modelo de relevo sombreado (*hillshade*) derivado do modelo digital de superfície.

A inventariação dos movimentos de vertente foi feita com base em fotointerpretação do ortomosaico, quer para a identificação dos limites dos movimentos de vertente, quer para o mapeamento dos diferentes elementos morfológicos que os caracterizam (e.g., cicatriz, flancos, orlas do deslizamento, fendas de tração e de cisalhamento). Para validação/correção dos limites e morfologia dos movimentos de vertente obtidos por fotointerpretação, foram utilizados, o modelo de relevo sombreado e registos fotográficos de campo, obtidos a 14 de fevereiro, poucos dias após o evento de instabilidade regional.

Numa última etapa, procedeu-se à inventariação dos movimentos de vertente, dando-se particular destaque à identificação dos limites da área instabilizada, à elaboração de cartografia geomorfológica de pormenor e à respetiva caracterização e classificação dos movimentos de vertente.

3. RESULTADOS PRELIMINARES

A fotointerpretação do ortomosaico para mapeamento dos limites/morfologia dos movimentos de vertente e respetiva validação/correção com observações efetuadas sobre o modelo de relevo sombreado e registos fotográficos de campo, permitiu a inventariação de 16 movimentos de vertente ocorridos em fevereiro de 2026 na área de estudo e a delimitação de uma área instabilizada de 179.212,2 m², correspondente a 18,1% da área de estudo (Fig. 1; Fig. 2). Estes novos movimentos de

vertente, quando comparados com o inventário histórico (Fig. 1), permitem identificar algumas situações de reativação total ou parcial de movimentos de vertente mais antigos. No entanto, a maioria das ocorrências atuais não apresenta partilha significativa de área/geometria com movimentos anteriores, o que justifica a assunção de inexistência de partilha da superfície de rotura. Estes 16 movimentos de vertente apresentam uma área instabilizada entre 30 m² e 109.469 m², uma área média de 11.200 m² e um DP de 27.451 m². Quanto ao tipo de movimento de vertente, estes são essencialmente do tipo deslizamento rotacional ou roto-translacional. Na vertente exposta a oeste foram cartografados dois movimentos de vertente complexos, alongados, com predomínio de deformação do tipo escoada.

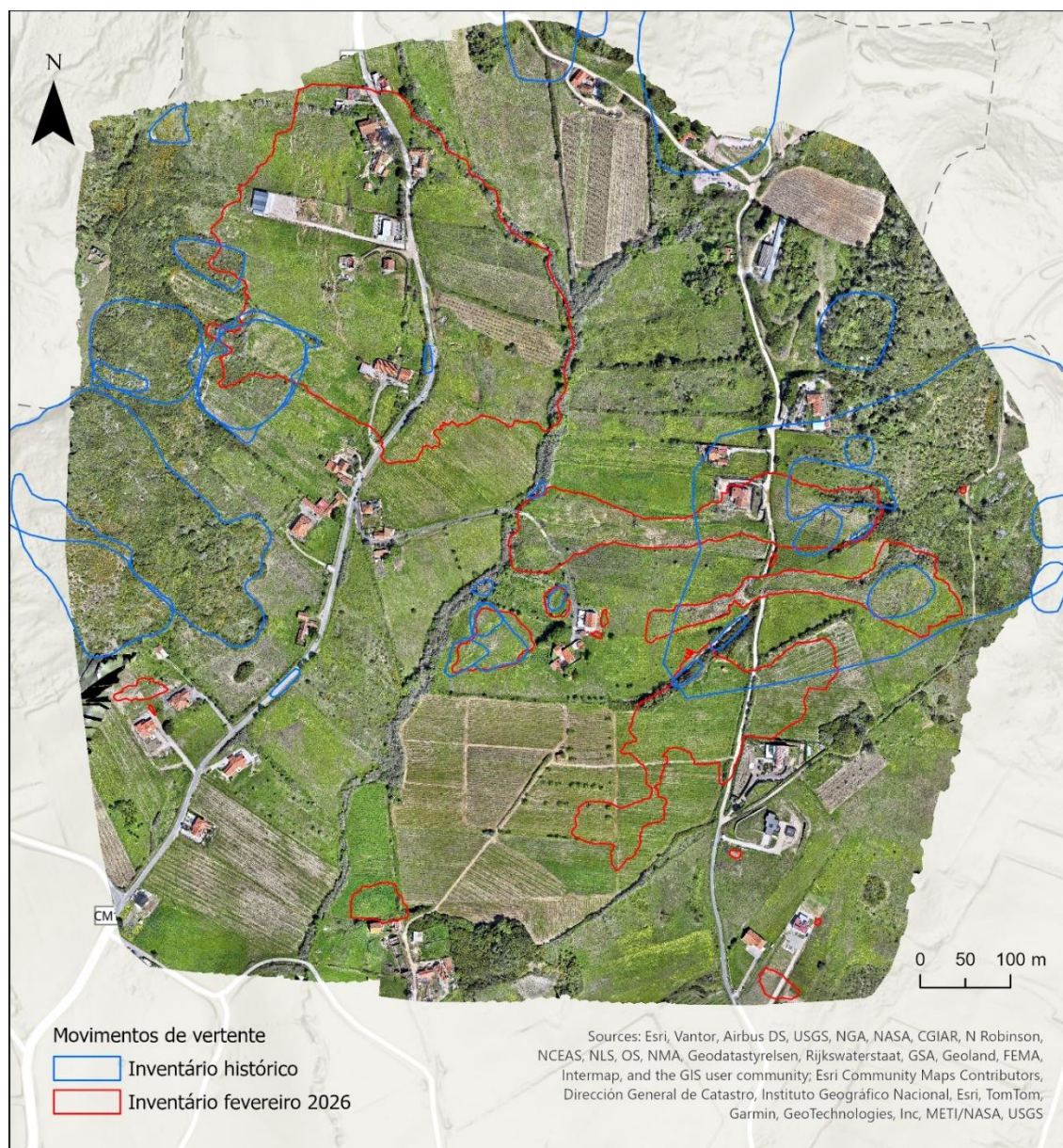


Figura 1. Ortomosaico de ultra-alta resolução e inventário de movimentos de vertente do evento de fevereiro de 2026 na área de estudo do Lapão, Arruda dos Vinhos. A azul, os movimentos de vertente do inventário histórico (Oliveira, 2012) e, a vermelho, os movimentos de vertente do evento de fevereiro de 2026.

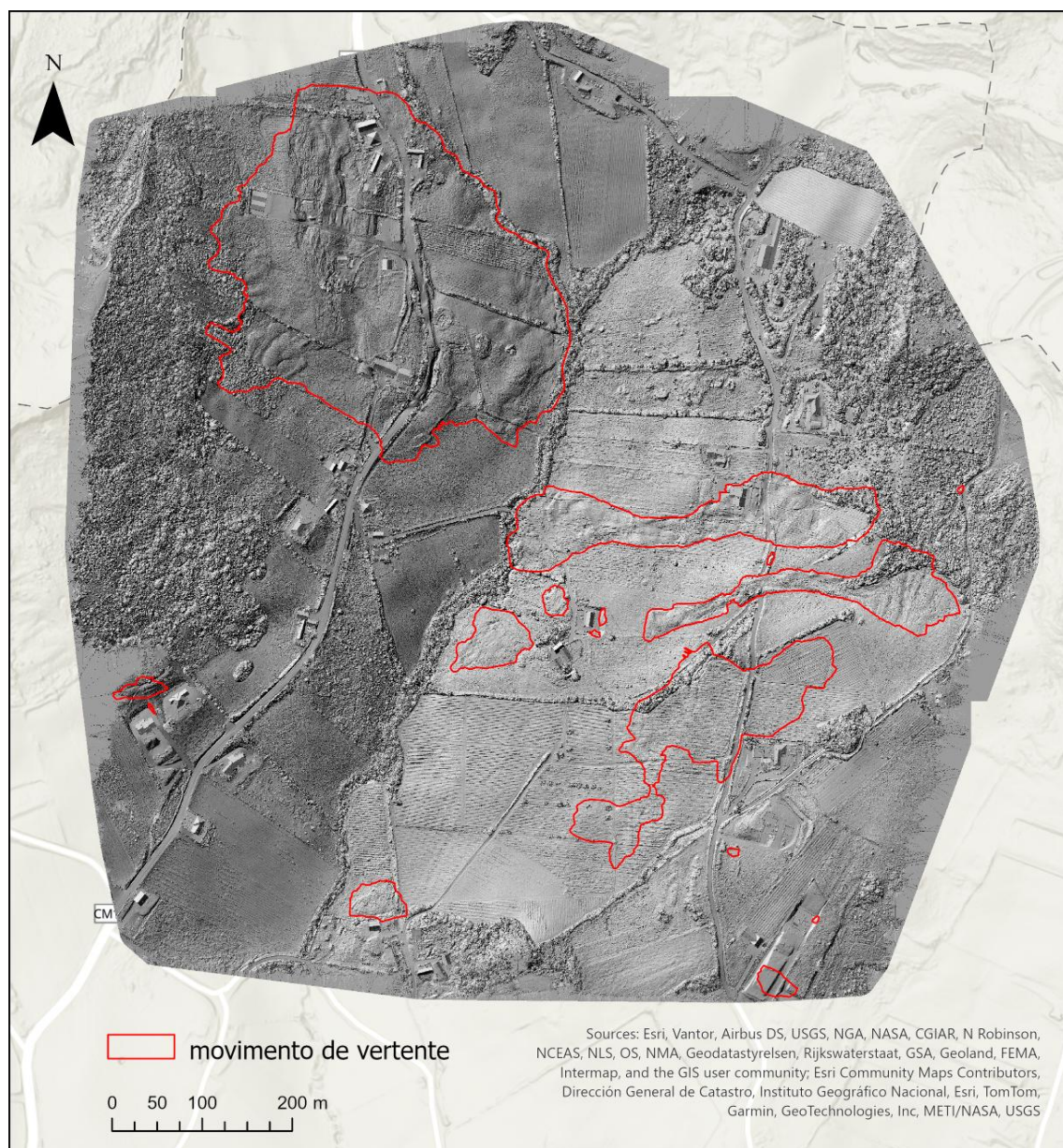


Figura 2. Modelo de relevo sombreado obtido a partir do DSM de ultra-alta resolução e inventário de movimentos de vertente do evento de fevereiro de 2026 na área de estudo do Lapão, Arruda dos Vinhos.

Uma primeira análise sobre a morfologia interna dos movimentos de vertente (cartografia a desenvolver posteriormente) permitiu identificar áreas de intensa deformação, com presença de fendas de tração, de cisalhamento e de fendas fechadas nas orlas do deslizamento, mas também de contra-escarpados e áreas com aclives, tendo estas observações, sido fundamentais para a definição a classificação do tipo de movimento de vertente.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A fotointerpretação do ortomosaico de ultra-alta resolução obtido com UAV, validada com recurso ao modelo de relevo sombreado e ao trabalho de campo, permitiu cartografar, caracterizar e classificar um conjunto significativo de movimentos de vertente ocorridos em fevereiro de 2026, que foram responsáveis por forte disrupção territorial, traduzida na destruição de estradas e do edificado. Os resultados obtidos demonstram o potencial da metodologia para a aquisição de informação crítica

pós-evento para apoiar a gestão de emergência pela proteção civil, bem como para o ordenamento do território.

Agradecimentos

Este trabalho foi apoiado por fundos públicos portugueses através da FCT - Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P, pela Unidade de Investigação UID/00295/2025 (DOI <https://doi.org/10.54499/UID/PRR/00295/2025>).

JLZ, SCO, RM, RACG e PPS foram apoiados pelo projeto EGMS RASTOOL-DoS: European Ground Motion Risk Assessment Tools - Downstream Service (UCPM-2024-KAPP-PP – 101193210).

Referências

- Oliveira, S. M. C. (2012) Incidência Espacial e Temporal da Instabilidade Geomorfológica na Bacia do Rio Grande da Pipa (Arruda dos Vinhos). Tese de Doutoramento, Instituto de Geografia e Ordenamento do Território, Universidade de Lisboa.
<https://repositorio.ulisboa.pt/entities/publication/3118593c-ec7a-441b-985a-7617a528aa0e>
- Zbyszewski, G., & Assunção, C. T. (1965). Notícia explicativa da folha 30-D (Alenquer). Carta Geológica de Portugal (1:50 000). Serviços Geológicos de Portugal. Lisboa.

Restauro de Corredores Ripícolas com Espécies Nativas: Uma Solução Baseada na Natureza para a Estabilização Geomorfológica e Proteção do Solo e da Qualidade da água

Restoration of Riparian Corridors with Native Species: A Nature-Based Solution for Geomorphological Stabilization and the Protection of Soil and Water Quality

M. Samussone^{1*}, R. Xavier²

¹ Universidade Rovuma, Departamento de Território e Riscos, Centro de Estudos em Território, Ambiente e Recursos Naturais, Napipine, Nampula Moçambique. samsons181@gmail.com;

² Universidade Rovuma, Departamento de Território e Riscos, Centro de Estudos em Território, Ambiente e Recursos Naturais, Napipine, Nampula Moçambique. rxavier@unirovuma.ac.mz

RESUMO

A reflorestação com espécies de eucaliptos em corredores ripícolas tem sido apontada como uma das razões do empobrecimento dos solos em termos de biodiversidade e funcionamento destes habitats, o que se traduz no aumento dos processos de erosão hídrica. Por outro lado, a restauração através da reflorestação com espécies nativas nessas áreas é considerada uma opção viável para inverter este processo. O objetivo é avaliar o efeito da reflorestação de áreas ripícolas com espécies florestais nativas (*A. quanzensis*) em zonas anteriormente ocupadas por Eucaliptos (*E. camaldulensis*).

Palavra Chaves: Restauração, reflorestação, estabilidade, áreas ripícolas, qualidade do solo, dualidade da água.

Keywords: Restoration, Reforestation, Stability, Riparian Areas, Soil, Water and Soil Quality

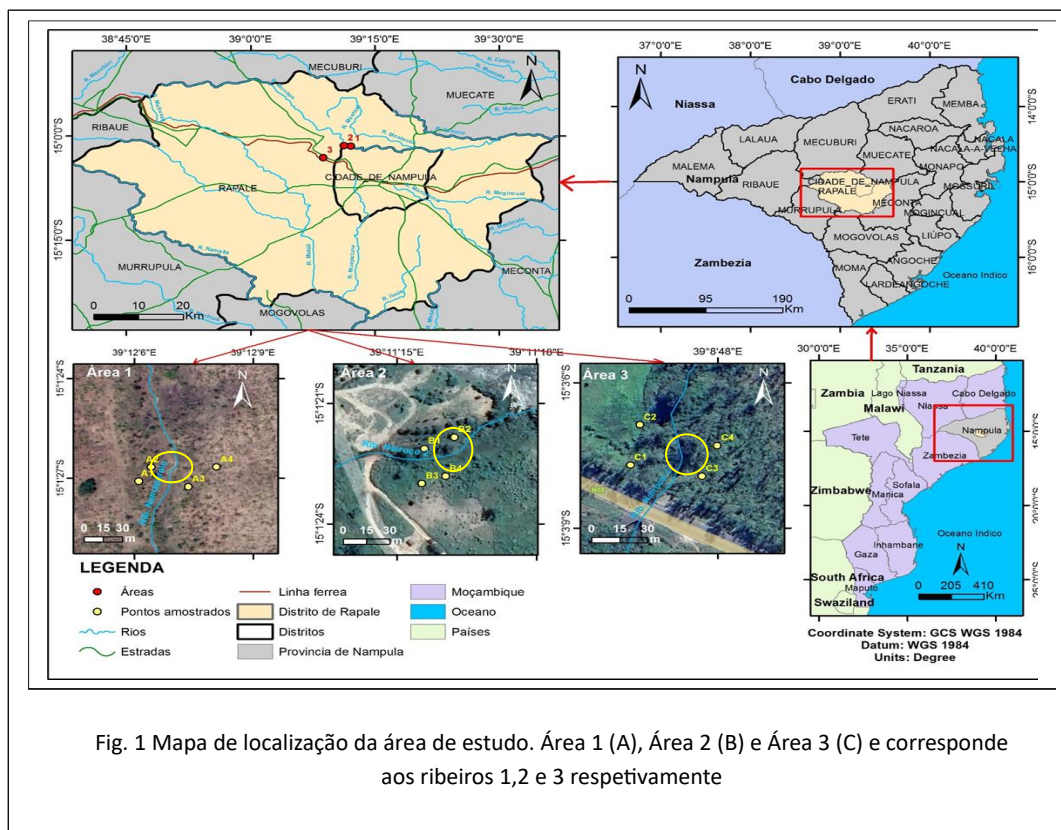
1. INTRODUÇÃO

As áreas ripícolas são áreas regularmente influenciadas pela hidrologia dos cursos de água doce adjacentes, apresentando tipologias e dimensões variadas, que normalmente se estendem desde as margens das massas de água adjacentes até às margens dos habitats terrestres existentes numa cota mais elevada (Tree, 2007). Estas áreas são amplamente conhecidas pelas suas diversas funções, de entre as quais a redução ou retenção de poluentes, caso dos nitratos, reduzindo a sua dispersão pelos ecossistemas aquáticos (Pinay et al., 2018). O tipo de vegetação influencia as suas características físicas, químicas e biológicas e atua como um importante mediador de energia e nutrientes entre os ecossistemas terrestre e aquático (Naiman, 2010; Tiegs et al., 2019). As suas características também são modeladas por condições ambientais com elevado dinamismo. As relações entre áreas ripícolas e os pequenos cursos de água são vitais para os organismos aquáticos e funcionamento do sistema (Abelho, 2001, Lake et al., 2007); A estabilidade das áreas ripícolas está dependente de vários fatores como o tipo de solo e o seu grau de estabilidade, a composição vegetal (e.g. Lecerf et al., 2005), o clima local e a topografia. Restaurar a integridade ecológica dos ribeiros afetados por plantações de eucalipto passa pela restauração destas áreas ripícolas sendo desejável que se atinja, tanto quanto possível, uma situação próxima da original usando espécies arbóreas nativas (Goncalves et al., 2007). No entanto, devido a falta de evidências claras, não existe um consenso quanto ao modo como esses

corredores ripícolas devem ser implementados, havendo necessidade de adequar os elementos necessários para a sua restauração e estabilidade, de entre os quais o tipo de vegetação dominante em função do tipo do solo e topografia (principalmente, o declive) de modo a aumentar a sua eficácia como a zona tampão em termos de eventuais cargas excessivas de nutrientes e outros compostos químicos para os ribeiros adjacentes e a jusante. Assim, a introdução de espécies novas pode afetar o equilíbrio ecológico dessas áreas, por exemplo, ao nível da decomposição foliar. O estudo das taxas de decomposição da matéria orgânica é importante tanto para ambiente terrestres como aquáticos e, em particular, na zona adjacente aos dois ecossistemas (Brett et al., 2017). Vários estudos indicam claramente que as zonas ripícolas servem de tampão, retendo os poluentes durante o escoamento superficial e subterrâneo (Dosskey, 2001). Por outro lado, os ribeiros e suas zonas ripárias representam ecossistemas que estão ligados por fluxos de material e organismos, onde os organismos aquáticos normalmente completam seu ciclo de vida no ecossistema terrestre, servindo de alimento importante para predadores terrestres (Graf et al., 2017) Por Isso o este trabalho pretende avaliar-se o efeito da reflorestação de áreas ripícolas com espécies florestais nativas em zonas previamente ocupadas com eucalipto na qualidade do solo e suas consequências no funcionamento das áreas ripícolas e sistemas ribeirinhos associados.

2. METODOLOGIA

O trabalho foi realizado em três ribeiros com floresta nativa, floresta mista e monocultura de espécies exóticas de *E. camaldulensis*, tendo sido estudada a importância da presença dessas espécies nativas e exóticas, nomeadamente, *E. camaldulensis*. nas áreas ripícolas no funcionamento de pequenos cursos de água no distrito de Rapale, Província de Nampula conforme a figura 1.



As atividades de campo consistiram na recolha de folhas das duas espécies para experiência no campo e no laboratório. Para análise das folhas das duas espécies, foi utilizado o modelo exponencial negativo ($X_t = X_0 \cdot e^{-kt}$, onde, X_t é a massa restante no tempo t , X_0 é a massa inicial e K é a taxa de decomposição, após um período de imersão das folhas no local (nos três ribeiros), dentro de sacos de 10 x 15 cm com uma malha de 0,5 mm, fixados a 10 cordas por ribeiro. Tal permitiu manter as folhas durante o período de estudo e monitorização. A retirada dos sacos dos locais de imersão ocorreu nos dias 2, 7, 14, 21 e 28 dos meses de junho e julho de 2021, no início da investigação.

3. RESULTADOS

No final dos 28 dias, a taxa de decomposição da massa seca remanescente de *A. quansensis* foi de 39,61%, inferior à de *E. camaldulensis* (53,83%) no mesmo ribeiro. (2). No que diz respeito à taxa de decomposição, a espécie em questão registou os seguintes valores: $-0,1865 \text{ dia}^{-1}$ e $0,1983 \text{ dia}^{-1}$, respetivamente. Para o Ribeiro 2, em relação às componentes químicas, as duas espécies (*E. camaldulensis* e *A. quanzensis*) também apresentaram diferenças, com valores médios percentuais de fenólicos (2,240; 0,961), carbono (0,451; 0,482), azoto (0,015; 0,025) e dureza (0,787; 0,491). Quanto ao componente químico, o quadro 1 mostra os dados obtidos

Quadro 1. Valores médios dos parâmetros físicos e químicos das folhas das espécies autóctones e ativas usadas na reflorestação das áreas ribeirinhas nos ribeiros do rio Monapo

Species	% P/g Dry mass		% Phenolics		C (%)		N (%)		Dureza(g)	
	Mean	SE	Mean	SE	Mean	SE	Mean	SE	Mean	SE
<i>E. camaldulensis</i>	0,090	0,003	2,240	0,067	0,451	0,23	0,015	0,01	0,787	0,124
<i>A. quanzensis</i>	0,228	0,010	0,961	0,328	0,489	0,75	0,025	0,02	0,491	0,028

4. DISCUSSÃO

A composição das espécies arbóreas da floresta ripícola onde foi realizado o estudo, pode explicar as diferenças nas taxas de decomposição folhares, devido as suas características físicas e químicas, assim como a estrutura das suas folhas (Kominoski et al., 2011). As espécies de *E. camaldulensis* estão mais presentes nos ribeiros #1 e #3, diferentemente do ribeiro #2, dominado por espécies nativas, o que pode justificar a diferença na maior decomposição da folhada das espécies testadas por existir maior presença de decompositores pelas condições de estabilidade que aí existe. Para o caso da espécie de *E. camaldulensis* estudos mostram que existem presença de componentes químicos que podem interferir na actividade microbiana no processo de decomposição, por exemplo o eucaliptol, etanona e outros (Akin et al., 2010).

5. CONCLUSÃO

Em Moçambique, tem-se verificado um aumento da introdução de espécies exóticas como Eucaliptos no geral e das atividades que alteram as características geomorfológicas das zonas ripícolas. Para restaurar estas áreas de forma sustentável, é essencial considerar soluções que incluam espécies nativas, adaptadas às características e condições específicas de cada local.

Agradecimentos

A todos que apoiaram o trabalho em especial à Professora Cristina Canhoto, Paulo José Sousa, Mania Cunha e os técnicos dos laboratórios.

Referências

- Akin, M. Aktumsek, A. (2010). Antibacterial activity and composition of the essential oils of *Eucalyptus camaldulensis* Dehn. and *Myrtus communis* L. growing in Northern Cyprus 4 (531-535). DOI:10.1016/j.jfda.2016.10.010.
- Abelho, M., & Descals, E. (2019). Litter movement pathways across terrestrial–aquatic ecosystem boundaries affect litter colonization and decomposition in streams. *Functional Ecology*, 33(9), 1785-1797. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.13356>Digital.
- Brett, Michael T. ; Bunn, Stuart E. ; Chandra, Sudeep ; Galloway, Aaron W. E. ; Guo, Fen ; Kainz, Martin J. ; Kankaala, Paula ; Lau, Danny C. P. ; Moulton, Timothy P. ; Power, Mary E. ; Rasmussen, Joseph B. ; Taipale, Sami J. ; Thorp, James H. ; Wehr, John D. Parte de *Freshwater biology*, 2017-05, Vol.62 (5), p.833-853. <https://doi.org/10.1111/fwb.12909>.
- Dosskey, M. G. (2001). Toward quantifying water pollution abatement in response to installing buffers on crop land. *Environmental Management*, 28(5), 577-598. DOI:10.1007/s002670010245.
- Kominoski, J. S., Marczak, L. B., & Richardson, J. S. (2011). Riparian forest composition affects stream litter decomposition despite similar microbial and invertebrate communities. *Ecology*, 92(1), 151-159. <https://doi.org/10.1890/10-0028.1>Digital.
- Naiman, R. J. (2005). *Riparia Ecology, Conservation, and Management of Streamside Communities*. Elsevier Academic Press 30 Corporate Drive, Suite 400, Burlington, MA 01803, USA 525 B Street, Suite 1900, San Diego, California 92101-4495. . ISBN: 9780126633153, 0126633150.
- Kominoski, J.S., Marczak, L.B. and Richardson, J.S. (2011), Riparian forest composition affects stream litter decomposition despite similar microbial and invertebrate communities. *Ecology*, 92: 151-159. <https://doi.org/10.1890/10-0028.1>.
- Lecerf, A., Dobson, M., Dang, C. K., & Chauvet, E. (2005). Riparian plant species loss alters trophic dynamics in detritus-based stream ecosystems. *Oecologia*, 146(3), 432-442. <http://dx.doi.org/10.1007/s00442-005-0212-3>.
- Pinay, G., Bernal, S., Abbott, B. W., Lupon, A., Marti, E., Sabater, F., & Krause, S. (2018). Riparian corridors: A new conceptual framework for assessing nitrogen buffering across biomes. *Frontiers in Environmental Science*, 6, 47. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2018.00047>.

Capítulo V - Riscos Geomorfológicos

Movimientos en masa e impacto del granizo extremo: la DANA de junio de 2016 en el occidente de Asturias

Mass movements and extreme hail impact: the June 2016 COLV event in western Asturias

D. Cañedo¹ *

¹ Universidad de Oviedo, Departamento de Geografía, C/ Francisco de Miranda, s/n, 33003, Oviedo/Uviéu, Asturias, España.

* gallinardavid@uniovi.es

RESUMEN

Este trabajo analiza los movimientos en masa activados por una Depresión Aislada en Niveles Altos (DANA) en el occidente asturiano en junio de 2016. Mediante reconocimiento de campo, análisis hemerográfico y datos de EUMETSAT/AEMET, se examina el impacto de una célula convectiva con temperaturas de tope de nube de -64 °C. Los resultados sugieren un efecto sinérgico entre el pedrisco extremo y la vulnerabilidad del suelo agrícola, superando los umbrales de escorrentía y generando flujos de lodo y daños estructurales.

Palabras clave: Asturias, DANA, granizo, riesgos naturales, flujos de lodo, inundaciones.

Keywords: Asturias, DANA, hail, natural hazards, mudflows, floods.

1. INTRODUCCIÓN

El fenómeno de la Depresión Aislada en Niveles Altos (DANA) se origina mediante la advección de una masa de aire frío en la troposfera superior que, al interactuar con capas bajas húmedas y cálidas, genera una inestabilidad convectiva extrema. Este proceso deriva en precipitaciones de alta intensidad, frecuentemente en forma de pedrisco (García de Pedraza, 1989). Si bien estas bajas segregadas son recurrentes en el litoral mediterráneo durante el otoño (Olcina Cantos *et al.*, 1998; Cuevas Tascón & Pascual Berghaenel, 2021; García Valero *et al.*, 2025), su presencia en la vertiente cantábrica constituye un hecho excepcional (Dirección General de Protección Civil y Emergencias, 2023). La escasez de bibliografía específica sobre DANAs en el norte peninsular, más allá de estudios genéricos sobre tormentas estivales (Sanz Moral *et al.*, 2004; Sánchez Gómez, 2022), subraya la necesidad de documentar episodios como el de junio de 2016. La singularidad de este evento radica en su capacidad para activar procesos geomorfológicos severos en áreas de media montaña, donde la respuesta de las laderas ante tales forzamientos atmosféricos es aún poco conocida. El presente trabajo analiza la relación entre esta dinámica convectiva y la generación de movimientos en masa rápidos en el occidente asturiano.

El área de estudio se concentra en la parroquia asturiana de Samartín de Sempaña y en el entorno de las localidades de Pelontre, Villaxulián (Figura 1), Campielu, Veiga de Rei, Samartín de Sempaña, además de otros puntos de los concejos asturianos de Tinéu, Ayande y Cangas del Narcea.

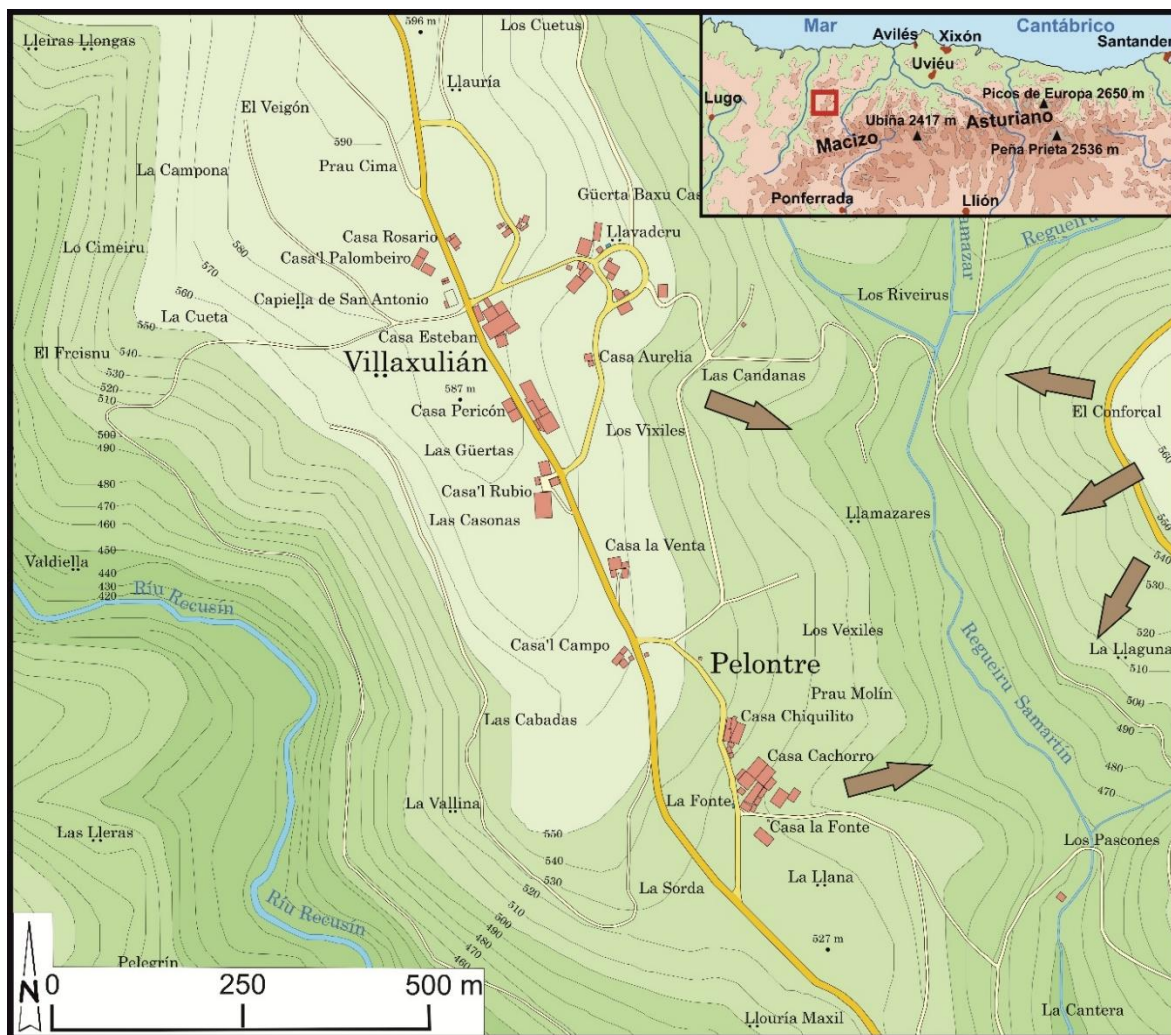


Figura 1. Mapa de localización de una de las zonas más afectadas. Las flechas indican el flujo de lodo causado por la DANA (Figuras 2 y 3).

2. MÉTODO

La metodología se articuló en tres fases complementarias: 1) reconocimiento geomorfológico de campo, 2) análisis hemerográfico y 3) caracterización hidrometeorológica mediante fuentes primarias.

- 1) El trabajo de campo, realizado los días 24 y 25 de junio de 2016, consistió en la inspección directa de las zonas afectadas para la identificación, cartografía y documentación fotográfica de los movimientos en masa. Esta fase se completó con encuestas de percepción y testimonios de la población local, esenciales para reconstruir la cronología de los flujos de lodo y la tipología de los daños.
- 2) En segundo lugar, se realizó una revisión de fuentes hemerográficas y medios de comunicación (*La Nueva España*, *El Comercio*, *RTPA*, *ABC*, *Telecinco* e informadores particulares) con el fin de contrastar la extensión espacial del evento y precisar los impactos en infraestructuras.
- 3) Finalmente, la caracterización atmosférica se basó en el análisis de datos de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), incluyendo registros de estaciones automáticas (precipitación horaria, temperatura y actividad eléctrica) y productos de teledetección del satélite EUMETSAT. El procesamiento de esta información permitió correlacionar la dinámica de la célula convectiva con la respuesta geomorfológica observada en las laderas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El 22 de junio de 2016, hacia las 17:00, tras una jornada de insolación intensa con máximas de 30,4 °C en la estación próxima de Santantolín (Ibias), el occidente asturiano registró un evento de convección profunda asociado a una DANA. El análisis de datos e imágenes del satélite EUMETSAT situó el núcleo de la célula convectiva en 43,681° norte / 6,417° oeste, con temperaturas de tope de nube de -64 °C, lo que desencadenó una génesis de pedrisco extremo con diámetros superiores a 5 cm y estructuras de crecimiento concéntrico (Figura 2). Aunque las estaciones más cercanas de la AEMET registraron intensidades de 36 mm en un día, con gran intensidad de aparato eléctrico, la magnitud de los procesos observados sugiere que los acumulados locales superaron ampliamente los umbrales oficiales en el epicentro de la tormenta. Esta precipitación súbita, concentrada en apenas 30 minutos, activó procesos de escorrentía superficial masiva y erosión hídrica acelerada, favorecidos por la ausencia de cubierta vegetal en parcelas agrícolas recién cosechadas. Como consecuencia directa, se originaron flujos de lodo (*mudflows*) y desprendimientos laminares en las laderas de núcleos como Pelontre, Villaxulián, Campielu y Samartín de Semproñana, movilizandovolumenes significativos de sedimento hacia la red vial, como las vías entre Veiga de Rei y el citado Samartín, y los fondos de valle (Figuras 2 y 3). Por su parte, la obstrucción de la red de drenaje antrópico por carga sólida y granizo derivó en inundaciones por desbordamiento, especialmente severas en La Puela (Ayande), así como en las villas de Cangas del Narcea y Tinéu. Los daños estructurales fueron generalizados, destacando la perforación por impacto en cubiertas en áreas industriales (Obanca) y agropecuarias, junto al colapso de sistemas de evacuación de aguas. Las encuestas de percepción y el registro hemerográfico confirman la excepcionalidad del evento en la memoria histórica regional, sin precedentes similares en intensidad y tipología de depósitos en las últimas décadas que provocó la declaración de zona catastrófica. La magnitud de los procesos observados sugiere un efecto sinérgico entre la precipitación líquida y el pedrisco extremo. El granizo no solo actuó como carga sólida, sino que pudo generar un sellado mecánico del suelo, reduciendo la infiltración y favoreciendo una escorrentía superficial inmediata, como atestiguan Streifender *et al.* (2023) en Austria. Este fenómeno, unido a la falta de cobertura vegetal por las labores agrícolas de junio, permitió que se superaran los umbrales críticos de activación de movimientos en masa, a pesar de que los registros de las estaciones oficiales (periféricas en el mejor de los casos) no reflejaran la intensidad real alcanzada en los núcleos de la célula convectiva.



Figura 2. (Izquierda) Flujo de lodo en las proximidades de Fontalba (Tinéu) (24-6-2016). (Centro). Carretera entre Veiga de Rei y Samartín de Semproñana (Tinéu) cubierta de

lodo (24-6-2016). (Derecha) Granizo recogido por una vecina (@azumorcuende) de la localidad de Murias (Tinéu) (22-6-2016).



Figura 3. (Izquierda) Corte en la capa de lodo sobre la carretera entre Veiga de Rei y Samartín de Semprouña (Tinéu) (24-6-2016). (Derecha) Vista desde Pelontre (Tinéu, Figura 1) de campos de cultivo afectados por movimientos de tierra (25-6-2016).

4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos demuestran que las DANAs no deben considerarse fenómenos exclusivos del ámbito mediterráneo, sino agentes geomorfológicos activos de primer orden en la vertiente cantábrica. La magnitud del evento de junio de 2016 confirma que la combinación de temperaturas extremas en el tope de la nube (-64 °C) y la falta de cobertura vegetal estacional en las laderas son factores críticos para el disparo de flujos de lodo (*mudflows*) de alta energía. En el actual escenario de cambio global, la «mediterrización» del clima en el norte peninsular sugiere un incremento en la frecuencia e intensidad de estos eventos extremos. Por ello, es imperativo integrar estos episodios de torrencialidad estival en los planes de prevención de riesgos naturales, ya que su capacidad para movilizar grandes volúmenes de sedimento y colapsar infraestructuras representa una amenaza creciente para la seguridad humana y la integridad del territorio en la cornisa cantábrica.

Referencias

- Cuevas Tascón, G., & Pascual Berghaenel, R. (2021). Episodio de tormentas y lluvias torrenciales en Cataluña durante los días 22 y 23 de octubre de 2019 (Notas técnicas de AEMET n.º 36). Agencia Estatal de Meteorología. <https://dx.doi.org/10.31978/666-20-027-X>
- Dirección General de Protección Civil y Emergencias. (2023). Guía de información al ciudadano ante fenómenos meteorológicos adversos. Ministerio del Interior; Gobierno de España.
- García de Pedraza, L. (1989). Dos tipos de adversidades meteorológicas: la nevada y el granizo. *Norba: Revista de Geografía*, (6-7), 21-30.
- García Valero, J. A., Núñez, J. Á., & Pascual Berghaenel, R. (2025). Anàlisi meteorològica de la situació de pluges intenses del 29 d'octubre de 2024 a la província de València. *Treballs de la Societat Catalana de Geografia*, (99), 11-29.
- Olcina Cantos, J., Rico Amorós, A. M., & Jiménez Rodríguez, A. (1998). Las tormentas de granizo en la Comunidad Valenciana: cartografía de riesgo en la actividad agraria. *Investigaciones Geográficas*, (19), 5-29. <https://doi.org/10.14198/INGEO1998.19.05>
- Sánchez Gómez, J. L. (2022). Fenómenos meteorológicos adversos más comunes que afectan a la Península Ibérica. *Publicaciones del Grupo de Física de la Atmósfera*, (16), 2-10. Universidad de León.
- Sanz Moral, M. P., Arteché García, J. L., & Ortiz Berenguer, F. J. (2004). Climatología de tormentas veraniegas en Cantabria, Asturias y País Vasco. En J. C. García Codron, C. Diego Liaño, P.

Fernández de Arróyabe Hernáez, C. Garmendia Pedraja, & D. Rasilla Álvarez (Eds.), El clima entre el mar y la montaña (pp. 409-418). Asociación Española de Climatología; Universidad de Cantabria.

Streifender, V., Hölbling, D., & Dabiri, Z. (2023). Impact of hail events on agriculture: A remote sensing-based analysis of hail damage in the context of climate change [Comunicación en congreso]. EGU General Assembly 2023, Viena, Austria. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-2551>

Risco de inundação por níveis do mar extremos no litoral setentrional do Rio Grande do Norte (Brasil) com geotecnologias abertas

Flood risk from extreme sea levels on the northern coast of Rio Grande do Norte, Brazil, using open geotechnologies

T. C. L. Silva^{1*}, M.T.M. Diniz², P.V.N. Araújo³, J.Y.G. Dos Santos², J.P. Da Silva⁴

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Departamento de Geografia, Natal, Rio Grande do Norte

² Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Departamento de Geografia, Caicó, Rio Grande do Norte

³ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Rio Grande do Norte, Campus Macau, Macau, Rio Grande do Norte

⁴ Universidade Federal da Paraíba, Departamento de Geociências, João Pessoa, Paraíba

* thiago.lins.115@ufrn.edu.br

RESUMO

As mudanças climáticas ampliam os riscos de inundação costeira, especialmente em regiões com baixa infraestrutura técnica. Este estudo avaliou os impactos potenciais da elevação do nível do mar até 2100 no litoral setentrional do Rio Grande do Norte. A metodologia integrou modelo digital de elevação calibrado com pontos geodésicos, séries históricas de marés e cenários do IPCC, utilizando dados abertos e o método bathtub. Os resultados indicam que até 14% da área analisada pode ser afetada, com maior concentração de risco em Areia Branca, Macau e Porto do Mangue. A abordagem demonstrou boa aplicabilidade regional e potencial de replicação em áreas com limitações de dados, contribuindo para o planejamento costeiro e estratégias de adaptação climática.

Palavras-chave: *Elevação do nível do mar; risco costeiro; geotecnologias.*

Keywords: *Sea-level rise; coastal risk; geotechnologies.*

1. INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas intensificam pressões sobre zonas costeiras de baixa altitude, onde a subida do nível do mar amplia processos de inundação e erosão, comprometendo ambientes naturais e áreas urbanas (Hinkel et al., 2018; IPCC, 2022). Esses impactos são particularmente relevantes no Sul Global, onde limitações técnicas e institucionais dificultam avaliações regionais consistentes de risco costeiro (Nagy et al., 2019). No litoral setentrional do Rio Grande do Norte, a combinação entre costa baixa e regime de maré predominante favorece a recorrência de inundações associadas à dinâmica oceânica regional (Araújo et al., 2021).

Nesse contexto, o uso de dados abertos integrados em modelos digitais de elevação calibrados representa uma alternativa viável para análises em áreas com infraestrutura de dados limitada, permitindo estimativas espaciais confiáveis de suscetibilidade à inundação (Muench et al., 2022; Vernimmen & Hooijer, 2023). Assim, este estudo tem como objetivo avaliar os riscos de inundação por marés associados à elevação do nível do mar no litoral setentrional do Rio Grande do Norte, fornecendo subsídios ao planejamento territorial e à adaptação climática regional.

2. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo localiza-se no litoral setentrional do estado do Rio Grande do Norte, Nordeste do Brasil, abrangendo parcialmente os municípios de Grossos, Tibau, Areia Branca, Porto do Mangue e Macau, incluindo os estuários dos rios Piranhas-Açu e Apodi-Mossoró (Figura 1). Trata-se de uma costa baixa, naturalmente suscetível à inundação associada à dinâmica marinha regional, com vários eventos catalogados (Araújo et al., 2021).

Predomina o regime de mesomarés semidiurnas, com amplitudes superiores a 2,5 m, que controlam a hidrodinâmica costeira e favorecem processos deposicionais em planícies estuarinas e salinas. A interação entre marés e ondas de baixa a moderada energia reforça a recorrência de eventos de inundação e a vulnerabilidade física das áreas urbanas próximas à linha de costa (Vital, 2009).

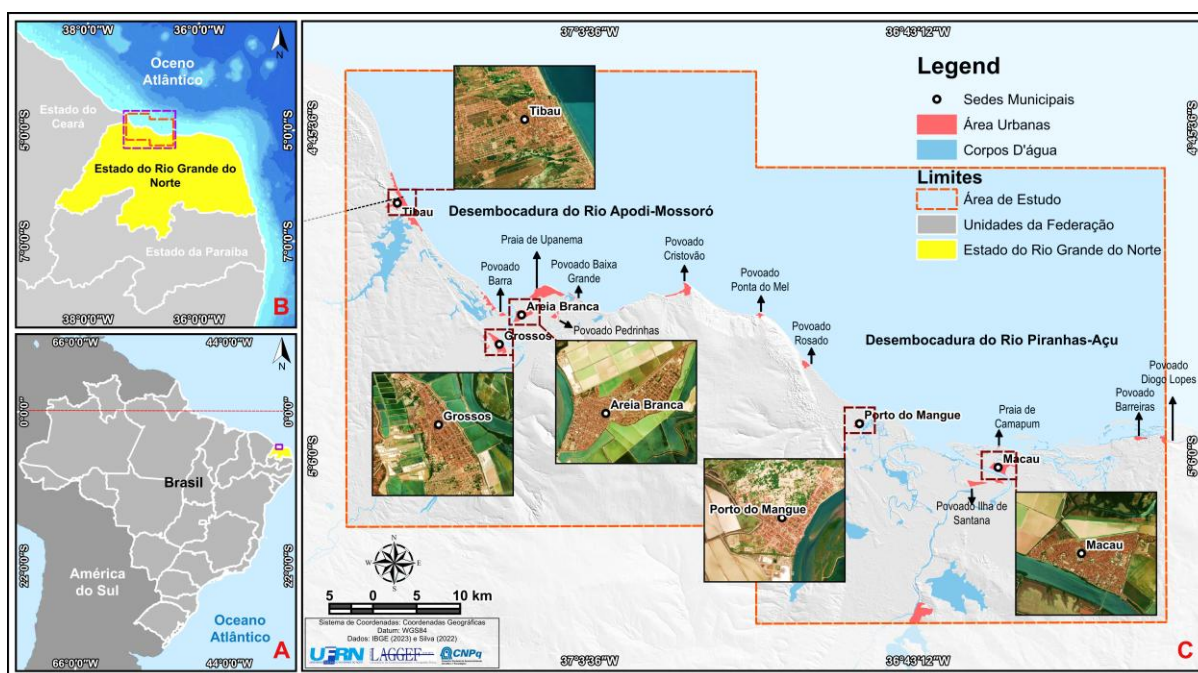


Figura 1. Localização da área de estudo, com as principais cidades em destaque. O recorte A localiza o Rio Grande do Norte no Brasil; B situa a área de estudo no litoral setentrional do estado; e C detalha a área analisada e as principais áreas urbanas em análise e em setas as localidades analisadas.

3. METODOLOGIA

A abordagem metodológica adotou o risco como resultado da interação entre perigo e vulnerabilidade física, integrando modelagem altimétrica, séries maregráficas e cenários projetados de elevação do nível do mar. Foram utilizados dados do modelo Copernicus DEM (30 m), calibrados com 28 pontos de controle geodésico do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e levantamentos GNSS, obtidos em campo, ajustados ao Sistema Geodésico Brasileiro.

As séries de marés astronômicas máximas foram obtidas do Departamento de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil (1940 – 2025), ajustadas ao referencial geodésico local associado aos níveis de redução das estações maregráficas de Macau e Areia Branca (Figura 2), assim como as sobre-elevações meteorológicas são derivadas da reamostragem de Yang et al. (2025) para o período entre 1940 até 2020. Posteriormente, foram calculados os níveis do período de retorno de 20 anos para as marés astronômicas e sobre-elevações meteorológicas em Areia Branca e Macau.

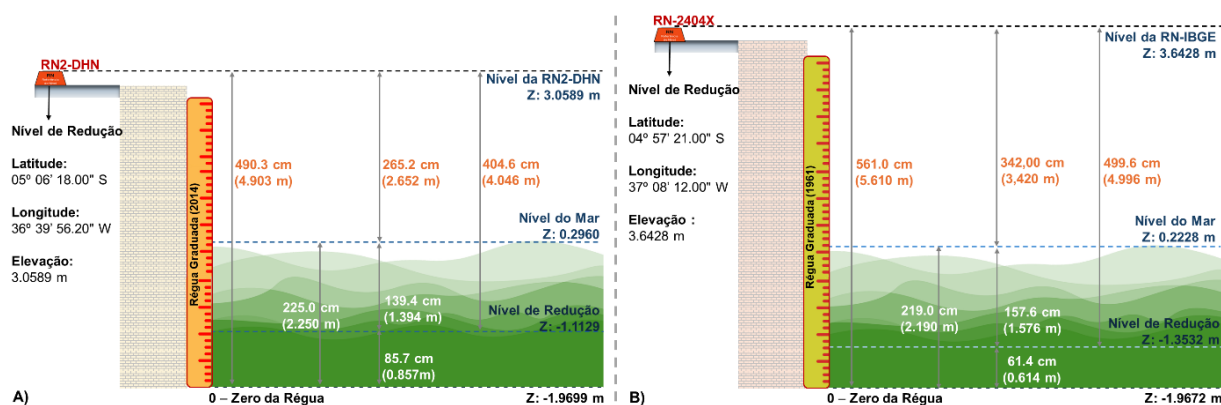


Figura 2. Estações maregráfica utilizadas. A – Estação Maregráfica de Macau. B – Estação Maregráfica de Areia Branca. Os códigos RN2-DHN e RN-2404X indicam as referências geodésicas associadas às estações.

Os cenários futuros consideraram as projeções do sexto relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (2022), dados da Rede Maregráfica Permanente para Geodésia (RMPG/IBGE), as projeções derivadas do Sistema de Modelagem Costeira do Brasil (SMC-Brasil) e altimetria por satélite do Copernicus Climate Change Service (SLA).

A modelagem de perigo utilizou o método bathtub sobre DEM calibrado (Araújo et al., 2021), enquanto a vulnerabilidade foi definida a partir do uso do solo do MapBiomias validado com imagens CBERS-4A, resultando na classificação espacial do risco costeiro pela ponderação das variáveis (Quadro 1).

Quadro 1. Classificação das variáveis utilizadas

Classe	Vulnerabilidade (uso do solo)	Perigo (cenários)	Intervalos de risco
5	Área urbana	Situação atual (extremos)	Muito alto (20–25)
4	Aquicultura	RMPG/IBGE; tendência SMC-Brasil	Alto (15–20)
3	Agricultura	SLA; SSP1-1.9; SSP1-2.6	Moderado (10–15)
2	Formações naturais	SSP2-4.5; SSP3-7.0	Baixo (5–10)
1	Praia, dunas e áreas arenosas	SSP5-8.5	Muito baixo (0–5)

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A integração dos mapas de perigo e vulnerabilidade permitiu delimitar as áreas de risco à inundação por níveis do mar extremos na faixa costeira analisada (Figura 3). A classe de risco alto correspondeu a 6,37% da área total, enquanto o risco extremamente alto (0,04%) concentrou-se principalmente em setores urbanos de Areia Branca, Macau e Porto do Mangue, evidenciando maior exposição territorial em áreas de baixa altitude próximas aos estuários, com predomínio de impactos em regiões insulares. Fora dos núcleos urbanos, destacaram-se áreas críticas nos povoados Baixa Grande (Areia Branca), Ilha de Santana (Macau) e Barra (Grossos), onde cerca de 20% da área ocupada apresentou níveis elevados de risco. Esses padrões espaciais são consistentes com registros anteriores para Areia Branca, especialmente quanto à distribuição das manchas de inundação extrema descritas por Araújo et al. (2021) e Aguiar et al. (2019), indicando recorrência regional dos processos e reforçando a confiabilidade das estimativas produzidas.

A análise integrada demonstrou ainda que zonas de risco elevado ultrapassam os limites urbanos consolidados, atingindo outras comunidades pesqueiras tradicionais como Rosado, Diogo Lopes, Ponta do Mel e Praia de Upanema. De forma mais expressiva, a sobreposição da modelagem com imagens aéreas permitiu identificar setores com maior concentração potencial de áreas residenciais afetadas, sobretudo em Areia Branca, Porto do Mangue e Macau, além de localidades específicas como Barra, Cristóvão e Baixa Grande, evidenciando impactos territorialmente seletivos e socialmente relevantes.

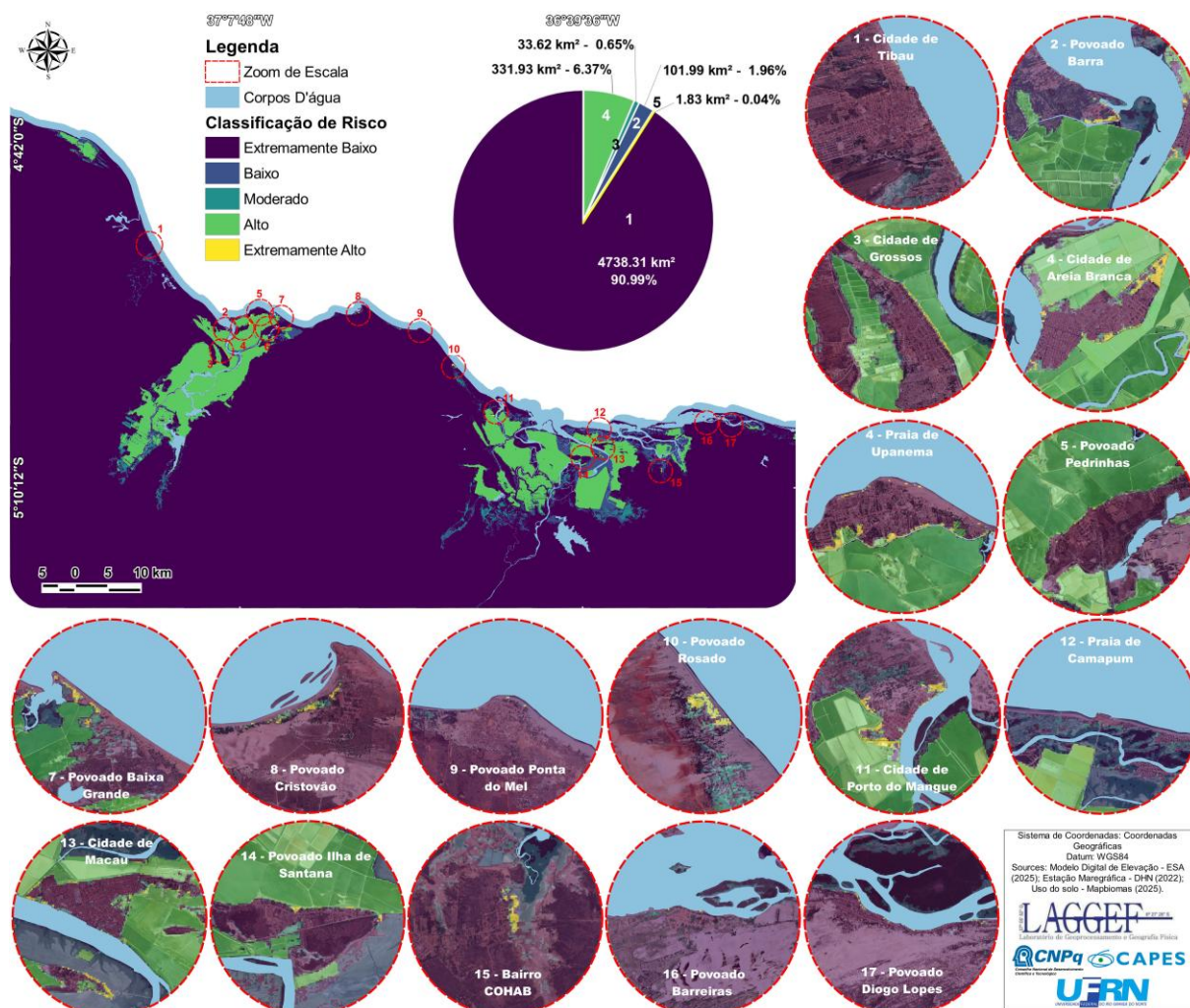


Figura 3. Mapa de risco a inundação com zoom de escala nas principais comunidades.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados evidenciaram a concentração do risco de inundação em áreas urbanas de baixa altitude e setores de salinas, com maior destaque para Areia Branca. A abordagem probabilística baseada em dados abertos e referencial geodésico mostrou-se eficaz e replicável para análises regionais. Os cenários indicam a necessidade de ordenamento territorial e planejamento adaptativo. Estudos futuros devem priorizar monitoramento mareográfico contínuo, validações geodésicas sistemáticas e modelagens hidrodinâmicas mais robustas para refinamento das estimativas de risco.

Referências

- Aguiar, L. S., Amaro, V. E., Araújo, P. V. N., & Santos, A. L. S. (2019). Low-cost geotechnology applied to flood risk assessment in coastal urban areas in climate change scenarios. *Anuário do Instituto de Geociências*, 42, 267–290. https://doi.org/10.11137/2019_1_267_290.
- Araújo, V. N., Amaro, V. E., Aguiar, L. S., Lima, C. C., & Lopes, A. B. (2021). Tidal flood area mapping in the face of climate change scenarios: Case study in a tropical estuary in the Brazilian semi-arid region. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 21, 3353–3366. <https://doi.org/10.5194/nhess-21-3353-2021>.
- Hinkel, J., Aerts, J. C. J. H., Brown, S., Jiménez, J. A., Lincke, D., Nicholls, R. J., Scussolini, P., Sanchez-Arcilla, A., Vafeidis, A., & Addo, K. A. (2018). The ability of societies to adapt to twenty-first-

- century sea-level rise. *Nature Climate Change*, 8, 570–578. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0176-z>.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). *Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, & B. Rama, Eds.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>.
- Muench, R., Cherrington, E., Griffin, R., & Mamane, B. (2022). Assessment of open access global elevation model errors impact on flood extents in southern Niger. *Frontiers in Environmental Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.880840>.
- Nagy, G. J., Gutiérrez, O., Brugnoli, E., Verocai, J. E., Gómez-Erache, M., Villamizar, A., Olivares, I., Azeiteiro, U. M., Leal Filho, W., & Amaro, N. (2019). Climate vulnerability, impacts and adaptation in Central and South America coastal areas. *Regional Studies in Marine Science*, 29, 100683. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2019.100683>.
- Vernimmen, R., & Hooijer, A. (2023). New LiDAR-based elevation model shows greatest increase in global coastal exposure to flooding to be caused by early-stage sea-level rise. *Earth's Future*, 11. <https://doi.org/10.1029/2022EF002880>.
- Vital, H. (2009). The mesotidal barriers of Rio Grande do Norte. In D. Muehe (Ed.), *Geology and geomorphology of Holocene coastal barriers of Brazil* (Vol. 107, pp. 227–260). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540-44771-9_9.
- Yang, L., Jin, T., & Jiang, W. (2025). ASM-SS: The first quasi-global high-spatial-resolution coastal storm surge dataset reconstructed from tide gauge records. *Earth System Science Data*, 17(6), 2793–2807. <https://doi.org/10.5194/essd-17-2793-2025>.

Rainfall-Triggered Landslide Spatial Patterns: Insights from Event-Based and Historical Inventories

Padrões Espaciais de Deslizamentos Desencadeados por Precipitação: Contributos dos Inventários de Eventos e Históricos

C. Villaça^{1*}, P. P. Santos¹, A. R. Morais¹, S. Oliveira¹, J. L. Zêzere¹

¹ Centro de Estudos Geográficos, Instituto de Geografia e Ordenamento do Território, Universidade de Lisboa (CEG-IGOT-ULisboa), Lisboa, Portugal;

* caiovillaca@edu.ulisboa.pt

ABSTRACT

This study examines how predisposing and triggering factors influence landslide spatial distribution in the northern part of the Lisbon Metropolitan Area, Portugal. Using data-driven susceptibility models, we compare event-based and historical inventories, showing that slope, aspect, and elevation are key drivers, but considering intense and localized rainfall is determinant for correctly analyzing the spatial variations of landslides. Model comparisons highlighted the individual strengths of each inventory type.

Keywords: Landslides; Inventory; Model; Susceptibility

Palavras-chave: Deslizamentos; Inventário; Modelo; Suscetibilidade

1. INTRODUCTION

Landslides are among the most destructive natural hazards, causing loss of life and billions in infrastructure damage worldwide (Sassa and Canuti, 2008). Assessing landslide susceptibility is a critical task in risk management. The analysis of landslide inventories is common method for modeling landslide susceptibility (Reichenbach et al., 2018). Event-based inventories document landslides from a single triggering episode, whereas historical inventories compile occurrences over extended periods. While numerous data-driven approaches have been developed for susceptibility modeling, few studies have systematically examined the implications of this distinction (Bornaetxea et al., 2023; Oliveira et al., 2024). This research addresses that gap by investigating the factors controlling the spatial distribution of rainfall-triggered landslides in the northern Lisbon Metropolitan Area (LMA), Portugal, where both inventory types are available. Two questions guided the research: (1) How does the spatial distribution of landslides during a specific rainfall event relate to predisposing and triggering factors? (2) Can event-based inventories capture the patterns of historical inventories, and vice versa?

2. METHODS

The study area covers the northern part of the Lisbon Metropolitan Area (LMA), a geomorphologically diverse region with a Mediterranean climate and a long record of rainfall-triggered landslides. Two landslide inventories were used: an event-based inventory of 1,028 landslides mapped from the extreme rainfall event of 18–19 November 1983, and a historical inventory of 3,196 occurrences

compiled from multiple sources, considering occurrences from 1865 to 2010. Predisposing factors included elevation, slope, aspect, lithology, and land use, derived from a 10 m-resolution DEM and official Portuguese cartographic sources. Rainfall data from 15 rain gauges were interpolated using Inverse Distance Weighting (IDW) to characterize the spatial distribution of the 1983 event. Five Random Forest classification models were developed under different configurations: one traditional susceptibility model for each event-based and historical inventory (Model 1 and 2), one model to discriminate whether a landslide belongs to the event-based or historical dataset (Model 3), one to relate rainfall distribution to landslide density (Model 4), and one susceptibility model incorporating triggering rainfall as an additional predictor (Model 5). Model performance was evaluated using AUC, AUPRC, precision, recall, F1-score, and cross-inventory testing.

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

Both susceptibility models (Model 1 and 2) achieved strong performance (AUC 0.84–0.85), but their outputs differed spatially: the historical model showed a northeastward shift in susceptible zones compared to the model that used the event-based inventory. Partial dependence plots showed consistent trends across both models (steeper slopes and north-facing aspects increase susceptibility), but the ranking of variable importance differed. Slope and aspect were the most important predisposing factors in the event-based model, whereas elevation rose to second place in the historical model. Cross-inventory testing revealed a clear performance drop, confirming that the two types of inventories capture spatially distinct landslide patterns. The model used to discriminate whether a landslide belongs to the event-based or historical dataset (Model 3) achieved moderate accuracy (65%) and AUC values (0.70), with elevation as the most influential differentiating factor: the event-based inventory concentrates landslides at lower elevations, while the historical inventory is better represented at higher elevations. The rainfall-density model (Model 4) demonstrated a strong relationship between rainfall spatial distribution and landslide density (accuracy = 89%), with rainfall identified as the primary driver of high-density clusters. The incorporation of rainfall as a predictor in Model 5 enhanced overall performance (AUC = 0.88). However, when the model trained on the event-based inventory with rainfall was validated against the historical inventory, predictive accuracy dropped substantially, effectively quantifying the spatial bias introduced by the localized rainfall pattern of the November 1983 event. These results highlight that the spatial pattern of a single rainfall event can distort the statistical relationship between landslides and predisposing factors, introducing biases in both susceptibility mapping and model validation when event-based inventories are used without caution.

4. CONCLUSIONS

This study demonstrates that event-based and historical landslide inventories are not interchangeable in susceptibility modeling. The spatial distribution of the November 1983 event in the Lisbon region was strongly shaped by the highly localized triggering rainfall, which introduced a geographic bias not representative of long-term landslide patterns. Three key methodological implications are identified: (1) traditional susceptibility models implicitly assume a spatially uniform triggering factor, an assumption that can distort outputs when event-based inventories are used; (2) event-based inventories should not be used uncritically for regional susceptibility mapping, as localized rainfall may create changes on the relationships with predisposing factors; and (3) event-based inventories must be used with caution when validating models built from historical data, as performance metrics may reflect spatial mismatches between inventory types rather than true predictive capacity. These

findings underscore the value of integrating both inventory types for comprehensive landslide susceptibility assessment and call for greater methodological transparency in inventory selection for data-driven hazard modeling.

Acknowledgments

This research was funded in whole or in part by the Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P. under Grant UID/00295/2025 (doi:10.54499/UID/00295/2025). Caio Villaça was funded through FCT, I.P., by the Grant 2022.14473.BD (DOI: 10.54499/2022.14473.BD).

References

- Bornaetxea, T., Remondo, J., Bonachea, J., Valenzuela, P. (2023). Exploring available landslide inventories for susceptibility analysis in Gipuzkoa province (Spain). *Nat. Hazards* 118 (3), 2513–2542.
- Oliveira, S.C., Zêzere, J.L., Garcia, R.A., Pereira, S., Vaz, T., Melo, R. (2024). Landslide susceptibility assessment using different rainfall event-based landslide inventories: advantages and limitations. *Nat. Hazards* 1–39.
- Sassa, K., Canuti, P. (2008). *Landslides-Disaster Risk Reduction*. Springer Science & Business Media.
- Reichenbach, P., Rossi, M., Malamud, B.D., Mihir, M., Guzzetti, F. (2018). A review of statistically-based landslide susceptibility models. *Earth Sci. Rev.* 180, 60–91.

Evolução Temporal e Variabilidade Espacial de Modelos de Suscetibilidade a Movimentos de Vertente no Vale da Ribeira Quente (Ilha de São Miguel, Açores)

Temporal Evolution and Spatial Variability of Landslide Susceptibility Models in the Ribeira Quente Valley (São Miguel Island, Azores)

M. Silva^{1*}, R. Marques¹, R. F. Silva^{1,2}, C. Andrade¹, P. Amaral³

¹ Instituto de Investigação em Vulcanologia e Avaliação de Riscos (IVAR), Universidade dos Açores

² Centro de Informação e Vigilância Sismovulcânica dos Açores (CIVISA), Universidade dos Açores

³ Laboratório Regional de Engenharia Civil (LREC), Governo Regional dos Açores

* maria.je.silva@uac.pt

RESUMO

Este trabalho analisa a variabilidade espaciotemporal da suscetibilidade a movimentos de vertente, com base em três inventários. A modelação da suscetibilidade foi realizada através do método do Valor Informativo (VI), integrando dez fatores de predisposição. Com recurso a curvas de sucesso e predição, observou-se uma ligeira melhoria com a inclusão dos inventários mais recentes. A análise dos valores informativos finais (*Ij*) para cada unidade de terreno, permitiu identificar algumas variações espaciais ao longo do tempo. De forma geral, os resultados evidenciam a estabilidade global dos modelos de suscetibilidade.

Palavras-chave: *Movimentos de Vertente, Suscetibilidade, Valor Informativo, Ribeira Quente, Ilha de São Miguel*

Keywords: *Landslides, Susceptibility, Information Value, Ribeira Quente, São Miguel Island*

1. INTRODUÇÃO

Os movimentos de vertente constituem processos geomorfológicos com elevado potencial destrutivo. Neste contexto, o presente trabalho tem como principal objetivo a análise da variabilidade espaciotemporal de modelos de suscetibilidade a movimentos de vertente.

A área de estudo localiza-se na ilha de São Miguel (Açores), abrangendo o Vale da Ribeira Quente, com uma extensão de 9,1 km². Esta área caracteriza-se pela predominância de vertentes com declive acentuados (> 35°) e pela presença de materiais vulcânicos pouco consolidados, fatores que contribuem para uma elevada suscetibilidade a movimentos de vertente. A freguesia da Ribeira Quente é frequentemente afetada por este tipo de fenómenos, destacando-se, em particular, o evento ocorrido a 31 de outubro de 1997, desencadeado por precipitação intensa, que resultou em 29 vítimas mortais e prejuízos económicos estimados em 21,3 milhões de euros (Cunha, 2003).

2. METODOLOGIA

A componente de análise espaciotemporal deste trabalho baseia-se na avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente ao longo do tempo. Para o efeito, foram desenvolvidos três inventários distintos e independentes (Fig. 1): o de 2004 (MV2004), elaborado por fotointerpretação a partir de

imagens com resolução de 0,4 m; o de 2010 (MV2010), produzido com recurso a imagens do Google Street View; e o de 2025 (MV2025), resultante de trabalho de campo. Estes inventários integram 1015, 226 e 263 movimentos de vertente, maioritariamente deslizamentos translacionais, alguns dos quais com evolução para escoadas, cartografados sob a forma de polígonos, correspondentes a 0,37 km², 0,04 km² e 0,10 km² de área instabilizada, respetivamente.

A análise da suscetibilidade foi realizada com base no método estatístico bivariado do Valor Informativo (VI), uma abordagem derivada de uma simplificação da teoria bayesiana (Yan, 1988; Yin e Yan, 1988), que permite quantificar a relação entre a variável dependente (movimentos de vertente) e as variáveis independentes (classes dos fatores de predisposição). Na modelação foram considerados 10 fatores de predisposição, organizados numa estrutura matricial com resolução espacial de 1×1 m. Oito destes fatores derivam do Modelo Numérico de Elevação (MNE), obtido em 2024 a partir de dados LiDAR (*Light Detection and Ranging*): Altitude (ALT), Declive (DEC), Exposição (EXP), perfis longitudinal (PLG) e transversal (PTR) das vertentes, Área de Contribuição (ACT), Inverso do *Wetness Index* (IWI) e Insolação Potencial (INS). Adicionalmente, foram ainda considerados a Distância aos Cursos de Água (DCA) e a Geologia (GEO). Em situações de ausência de instabilidade numa das classes, é atribuído o valor mínimo de li, calculado para as restantes classes do respetivo fator de predisposição.

A validação dos modelos foi realizada através de curvas de sucesso e de predição. Todo o processo foi automatizado com recurso ao protótipo *ALSA-Tools* (Silva, 2018), permitindo gerar todas as combinações possíveis de fatores, identificar a melhor combinação ao longo do tempo, avaliar a variabilidade do ajuste aos dados de entrada e analisar a capacidade preditiva.

Complementarmente, foi avaliada a variabilidade espaciotemporal dos modelos através da subtração dos valores informativos finais (*Ij*) de cada unidade de terreno, para diferentes períodos temporais, com base na agregação de inventários.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 1 apresentam-se os resultados dos melhores modelos de suscetibilidade para os três períodos temporais analisados, selecionados a partir de um conjunto de 1023 modelos (total de combinações considerando 10 fatores de predisposição) desenvolvidos e avaliados para cada período. A melhor combinação, comum aos diferentes períodos e determinada com base na Área Abaixo da Curva (AUC) das respetivas Curvas de Sucesso, integrou sete fatores de predisposição: ACT, ALT, DCA, DEC, EXP, GEO e PLG.

O modelo com melhor capacidade de ajuste aos dados de entrada corresponde ao desenvolvido para o inventário MV2004, com AUC = 0,70. Os modelos para MV2004_2010 e MVTOT apresentaram AUC = 0,69. Verifica-se que, embora exista uma ligeira degradação da AUC ao longo do tempo, esta é praticamente insignificante.

A avaliação da capacidade preditiva, com base em curvas de predição, revelou que o modelo desenvolvido com MV2004 e validado com MV2010 apresenta AUC = 0,65, enquanto o modelo baseado em MV2004_2010 e validado com MV2025 apresenta AUC = 0,67. Estes resultados evidenciam um aumento da capacidade preditiva do algoritmo ao longo do tempo, o que pode ser justificado pelo aumento do número de movimentos de vertente considerados no inventário de modelação, o que contribui para uma maior robustez estatística na parametrização do modelo de suscetibilidade.

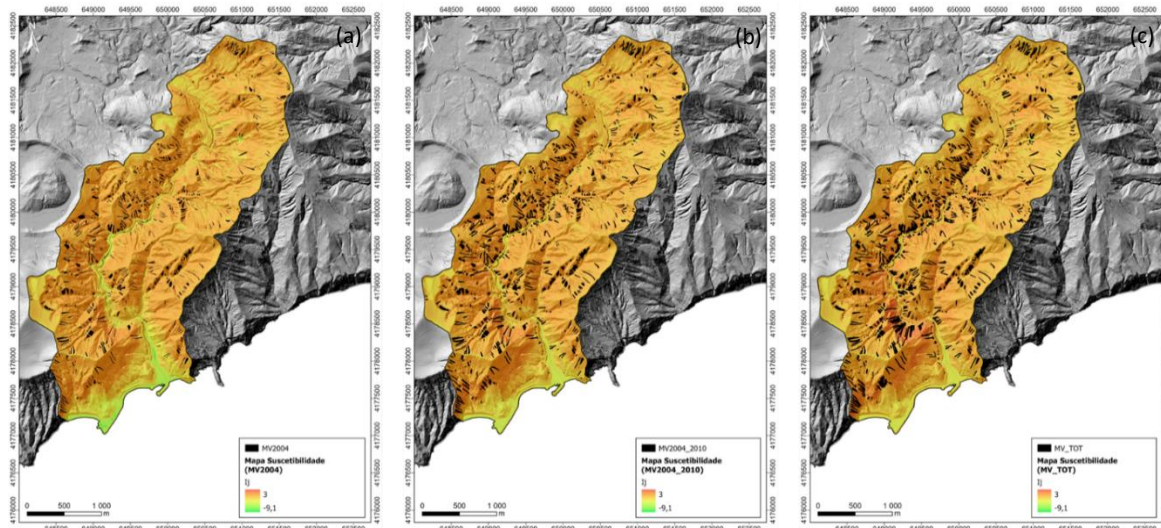


Figura 1. Mapas de Suscetibilidade obtidos para a melhor combinação de fatores de predisposição, tendo por base:
a) MV2004, b) MV2004_2010, c) MVTOT.

Nas Figuras 2 e 3 apresenta-se a análise da variabilidade espacial, com base na comparação dos valores informativos finais (I_j) dos melhores modelos de suscetibilidade obtidos para cada período temporal. Na Figura 2, observa-se que, para a maioria das unidades de terreno (UTs), não se registam alterações significativas no valor de I_j entre 2004 e 2010 ($\Delta I_j = [-0,25; 0,25]$). No entanto, verifica-se uma tendência de aumento do valor de I_j em UTs que inicialmente apresentavam valores negativos (Fig. 2b), correspondendo predominantemente a áreas de menor altitude localizadas ao longo do fundo do vale da Ribeira Quente (Fig. 2a). Considerando a variabilidade espacial dos valores de I_j entre 2010 e 2025, observada na Figura 3, verifica-se igualmente a ausência de alterações significativas na maioria das UTs. No entanto, ao contrário do período anterior, destaca-se um elevado número de UT onde ocorre uma diminuição do valor de I_j ($\Delta I_j < -0,25$) (Fig. 3b), ainda que também se registem aumentos pontuais do valor de I_j na área de estudo (Fig. 3a).

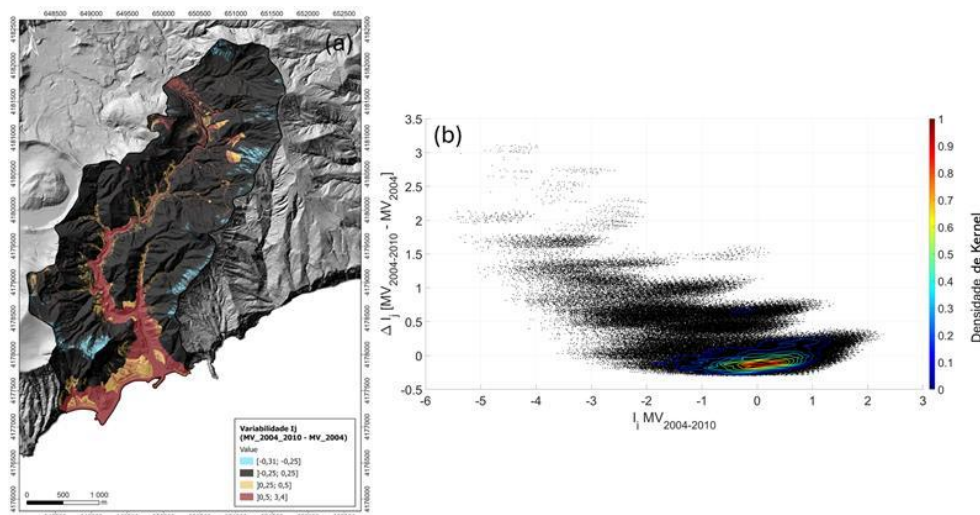


Figura 2. (a) Variabilidade espacial e (b) temporal dos valores de I_j , considerando a diferença entre o modelo resultante da agregação dos inventários de 2004 e 2010 (MV2004_2010) e o modelo baseado em MV2004.

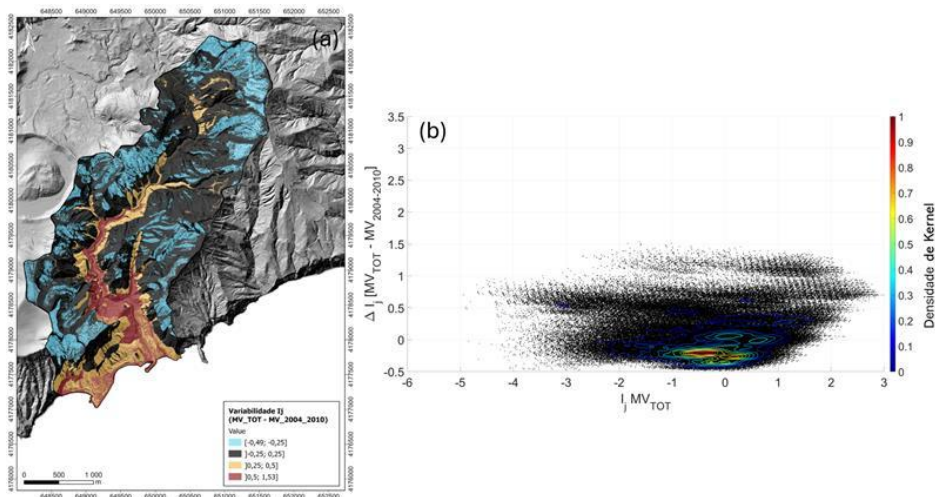


Figura 3. (a) Variabilidade espacial e (b) temporal dos valores de I_j , considerando a diferença entre o modelo baseado em MVTOT e o modelo resultante da agregação dos inventários de 2004 e 2010 (MV2004_2010).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados demonstram uma elevada estabilidade dos modelos de suscetibilidade ao longo do tempo. A consistência da melhor combinação de fatores de predisposição ao longo do tempo confirma a robustez do modelo. Ainda assim, a análise espaciotemporal evidencia dinâmicas locais relevantes, sugerindo que, apesar da robustez global dos modelos, a suscetibilidade não é espacial nem temporalmente estática. O aumento da capacidade preditiva com a incorporação de inventários mais recentes demonstra alguma variabilidade nas relações espaciais dos diferentes inventários com os fatores de predisposição, o que reforça a importância da atualização dos inventários de movimentos de vertente, enquanto fator determinante para o aperfeiçoamento dos modelos de suscetibilidade. Estes resultados sublinham que a qualidade e representatividade dos inventários são determinantes para a fiabilidade dos modelos de suscetibilidade e, consequentemente, para o seu potencial de aplicação em estratégias de ordenamento do território e mitigação do risco.

Agradecimentos

Trabalho integrado no projeto PRISMAC (ref.ª 1/MAC/2/2.4/0112), cofinanciado a 85% pelo Programa de Cooperação Territorial INTERREG VI D (MAC 2021–2027) e a 15% pela Direção Regional da Ciência, Tecnologia e Comunicações (DRCTC) do Governo Regional dos Açores (medidas de financiamento M2.2.A/COFUND MAC/005/2024/UAc e M2.2.A/COFUND MAC/005/2024/FGF).

Referências

- Cunha, A. (2003). The October 1997 landslides in San Miguel Island, Azores, Portugal. 27-32. In: Javier, H. (Ed.), Lessons Learnt from Landslide Disasters in Europe. European Commission Joint Research Centre. 92 p.
- Silva, R.F. (2018). Desenvolvimento de um protótipo computacional para análise e cartografia automática da suscetibilidade a movimentos de vertente. Tese de mestrado em Vulcanologia e Avaliação de Riscos. Departamento de Geociências da Universidade dos Açores. 127 p.
- Yan, T.Z. (1988) - Recent advances of quantitative prognoses of landslides in China. In: Bonnard, C. (Ed.), Landslides. Proc. 5th International Symposium in Landslides, Lausanne, A.A. Balkema, Rotterdam, Holanda. 2, 1263-1268.

Yin, K.L. e Yan, T.Z. (1988). Statistical prediction model for slope instability of metamorphosed rocks.
In: Bonnard, C. (Ed.), Landslides. Proc. 5th International Symposium in Landslides, Lausanne,
A.A. Balkema, Rotterdam, Holanda. 2, 1269-1272.

Avaliação da exposição às Áreas de Deformação Ativa (ADA) em Portugal continental com base em dados do European Ground Motion Service (EGMS)

Assessment of exposure to Active Deformation Areas (ADA) in mainland Portugal based on data from the European Ground Motion Service (EGMS)

B. Duarte^{1*}, J.L. Zêzere^{1,2}, R. Melo^{1,2}, N. Mileu^{1,2}, A. Barra³, R. Palamà³, M. Cuevas-González³, O. Montserrat³

¹ Centro de Estudos Geográficos, IGOT, Universidade de Lisboa

² Laboratório Associado TERRA

³ Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya (CTTC/CERCA), Divisão de Geomática

* beatrizrduarte@edu.ulisboa.pt

RESUMO

Este estudo avalia a exposição às Áreas de Deformação Ativa (ADA) em Portugal continental, integrando dados EGMS e informação geoespacial em SIG. Foram identificadas 2 284 ADA e foi analisada a exposição de edifícios, população, elementos críticos e redes de transporte. Os resultados mostram maior concentração de ADA e, consequentemente, maior exposição no Alentejo e no Oeste e Vale do Tejo, evidenciando a utilidade do método para apoio à gestão do risco.

Palavras-chave: ADA; exposição; Portugal; NUTS II; elementos/infraestruturas críticas.

Keywords: ADA; exposure; Portugal; NUTS II; critical elements/infrastructure.

1. INTRODUÇÃO

As Áreas de Deformação Ativa (ADA) são regiões geográficas que apresentam deformação do solo detetável por técnicas de interferometria SAR (InSAR), identificadas a partir de séries temporais de deslocamento (Barra *et al.*, 2017). O *European Ground Motion Service* (EGMS), baseado em imagens dos satélites Copernicus Sentinel-1, disponibiliza produtos de deformação do solo a escala europeia com elevada precisão (Costantini *et al.*, 2021), permitindo identificar e monitorizar fenómenos como deslizamentos, subsidência ou movimentos diferenciais, bem como processos de origem antropogénica, tais como a subsidência devido à extração de águas subterrâneas e atividades mineiras (Crosetto *et al.*, 2025). No presente estudo, as ADA foram extraídas a partir dos dados EGMS e classificadas segundo a metodologia de Palamà *et al.* (2024).

A deformação do solo representa um importante fator de risco, podendo afetar a estabilidade de edifícios, infraestruturas e redes de transporte, tal como a segurança da população. Em Portugal continental, a identificação e caracterização destas áreas assume particular importância no contexto do ordenamento do território e da mitigação de riscos naturais e antrópicos, sendo fundamental a sua análise em articulação com a distribuição espacial dos elementos expostos.

O presente estudo insere-se no âmbito do projeto europeu RASTOOL-DoS, estando focado na identificação da exposição a fenómenos de deformação do solo. Deste modo, procura-se contribuir para o desenvolvimento de ferramentas e metodologias de apoio à análise do risco e tomada de decisão.

Assim, o objetivo geral deste trabalho é avaliar a exposição às ADA em Portugal continental, com base em dados de deformação do solo provenientes do EGMS, integrados com informação georreferenciada de elementos expostos.

Os objetivos específicos desta investigação são:

- Identificar e avaliar os elementos expostos às ADA, incluindo população, edifícios residenciais, equipamentos e/ou infraestruturas críticas e redes ferroviária e rodoviária;
- Analisar a distribuição espacial da exposição em diferentes regiões do território;
- Contribuir para a identificação de áreas prioritárias para intervenção e monitorização.

Por fim, este trabalho pretende contribuir para uma melhor compreensão da relação entre os processos de deformação do solo e os elementos expostos, obtendo resultados relevantes para o apoio à decisão no âmbito do ordenamento do território e da gestão do risco no planeamento de emergência.

2. METODOLOGIA

A metodologia adotada baseia-se na integração de dados de deformação do solo com informação geoespacial de elementos expostos, recorrendo a ferramentas de Sistemas de Informação Geográfica. Foram utilizados dados de deformação do solo provenientes do EGMS (produto *Basic*), a partir dos quais foram extraídas as ADA e classificadas segundo o método de Palamà *et al.* (2024), permitindo distinguir processos de subsidência, deslizamento e soerguimento.

Para identificar a exposição, foram utilizados dados populacionais extraídos dos Censos de 2021, cartografia de edifícios residenciais, localização de infraestruturas/equipamentos críticos (Quadro 1) e redes de transporte (rodoviária e ferroviária).

Quadro 1. Listagem de infraestruturas/equipamentos críticos selecionados por categoria, a partir do OpenStreetMap.

Categoria	Elemento	Categoria	Elemento
Pontos de interesse	Câmara Municipal	Transporte	Aeroporto
	Centro comunitário		Campo de aviação
	Escola		Estação ferroviária
	Esquadra de polícia		Heliporto
	Faculdade		Apeadeiro
	Farmácia		Parque que estacionamento
	Hospital		Terminal de ferry
	Hostel		Terminal rodoviário
	Hotel	Tráfego	Área de serviço
	Jardim de infância		Barragem
	Lar de idosos		Posto de abastecimento de combustíveis
	Motel		
	Parque de caravanas		
	Prisão		
	Quartel de bombeiros		
	Refúgio de montanha		
	Reservatório de água		
	Universidade		

A análise consistiu na interceção das ADA com os diferentes elementos expostos, permitindo estimar o número de edifícios residenciais e de pessoas potencialmente afetadas, assim como identificar infraestruturas e equipamentos críticos localizados em ADA e avaliar a extensão das redes de transporte afetadas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

No território continental português foram identificadas 2 284 ADA, das quais 1 387 correspondem a subsidências (61 %), 827 a deslizamentos (36 %) e 70 a soerguimentos (3 %) (Figura 1). É na região do Alentejo que se regista o maior número de movimentos de subsidência e soerguimento (645 e 31, respetivamente) enquanto na região Norte se identificam mais deslizamentos (318). O Alentejo é a região que regista mais ADA (777), em contraste com a Península de Setúbal onde se registam apenas 87 ADA.

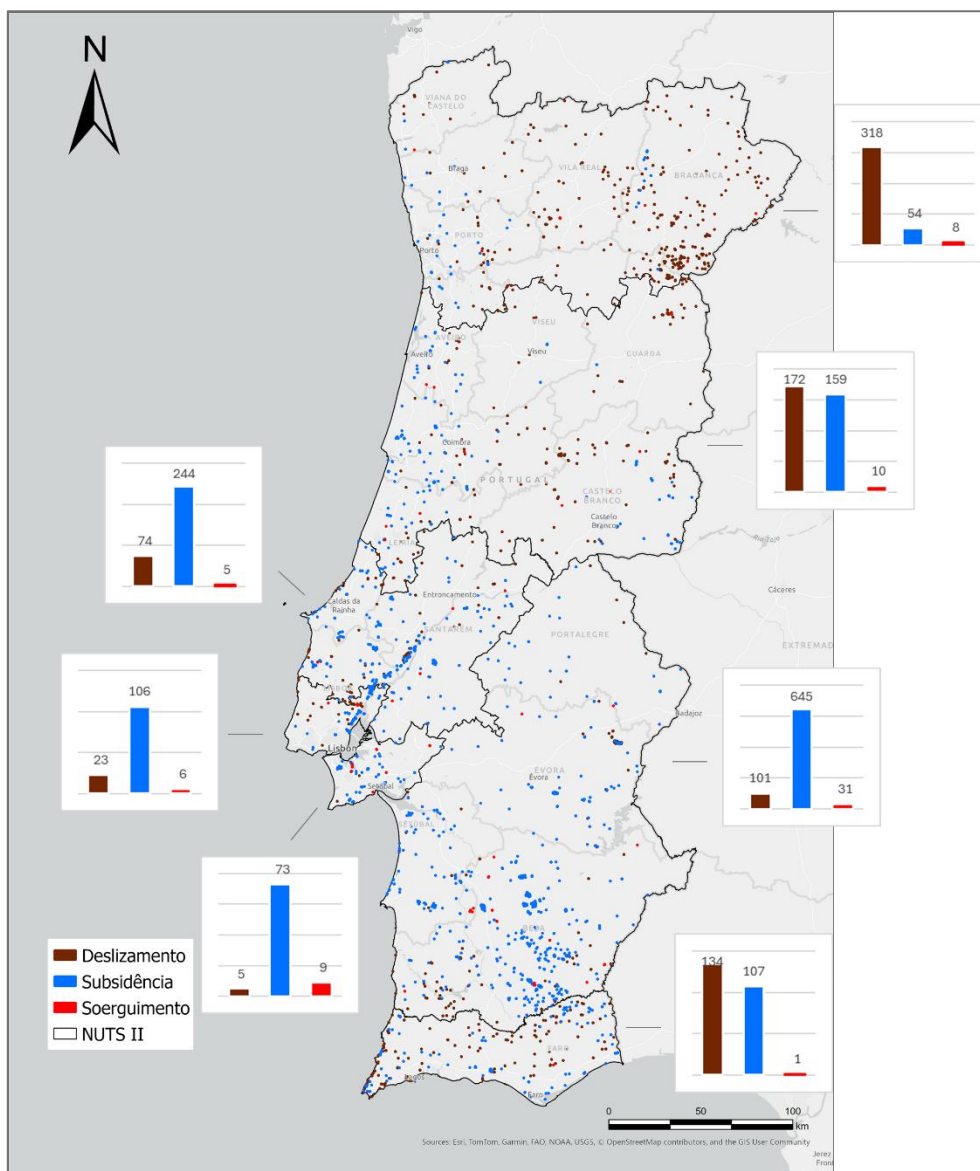


Figura 1. ADA classificadas por tipo de processo.

Analisando a exposição de edifícios residenciais e elementos críticos (Figura 2), verifica-se que, dos 3 386 084 edifícios residenciais existentes em Portugal continental, 360 estão expostos (0,01 %). No caso dos 14 360 elementos críticos selecionados, 30 encontram-se em ADA (0,21 %). No Oeste e Vale do

Tejo regista-se o maior número de edifícios residenciais expostos (98), assim como o maior quantitativo de população residente exposta (209). Nas regiões da Grande Lisboa, Alentejo e Oeste e Vale do Tejo verifica-se o maior número de elementos críticos expostos (7). No total, a região do Oeste e Vale do Tejo concentra o maior número elementos expostos (105), em contraste com a Península de Setúbal, onde se registam apenas 19.

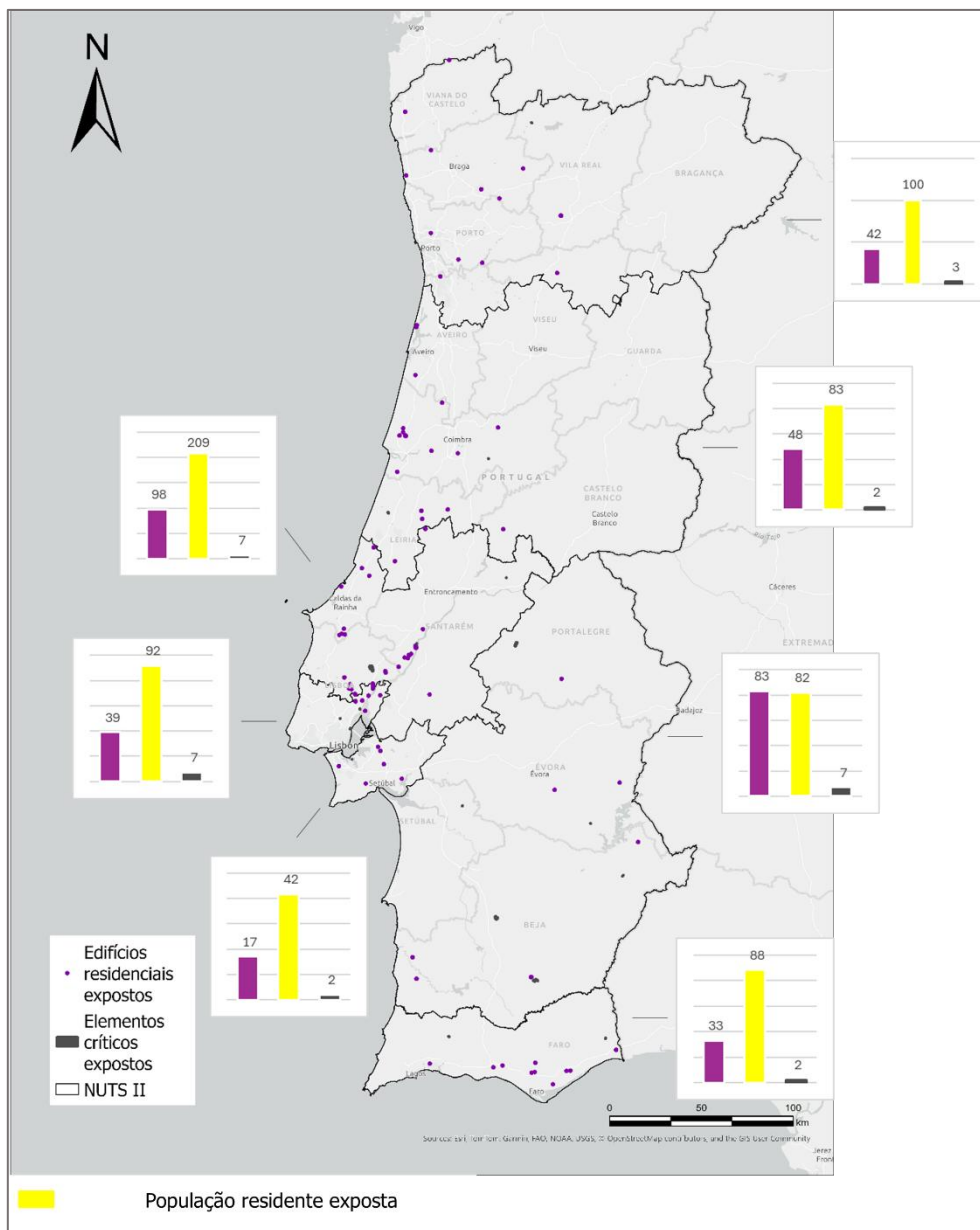


Figura 2. Edifícios residenciais, população residente e elementos críticos expostos.

Quanto às redes de transporte (Figura 3), dos 25 666 km da rede rodoviária fundamental em Portugal continental, 16,5 km encontram-se em ADA (0,1 %), enquanto, dos 4 633,3 km da rede ferroviária, 27,7 km estão expostos (0,6 %). A maior extensão rodoviária exposta às ADA encontra-se nas regiões da Grande Lisboa e do Centro (5,3 km), enquanto a maior extensão ferroviária observa-se na região do Oeste e Vale do Tejo (16,7 km), sendo que a região da Grande Lisboa apresenta, em comparação com as restantes NUTS II, uma vasta linha férrea exposta (10,3 km). Assim, as regiões do Oeste e Vale do Tejo e da Grande Lisboa são as que têm mais vias de transporte expostas (20 km e 16 km,

respetivamente), contrastando com a região do Algarve, onde os troços de redes de transporte expostos às ADA não totalizam 1 km.

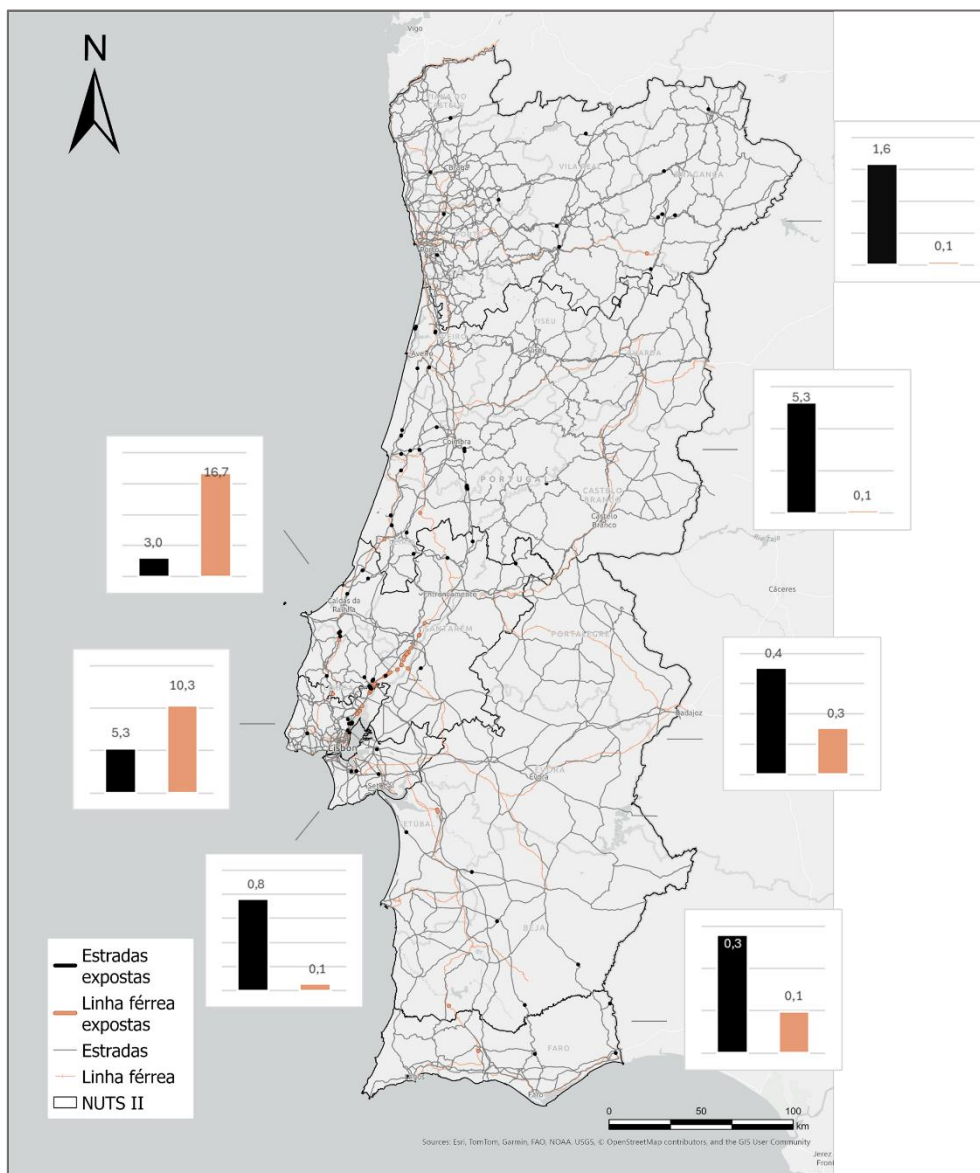


Figura 3. Estradas e linha férrea exposta.

Os resultados obtidos podem ser utilizados no apoio à gestão do risco, fornecendo informação temática relevante e atempada para apoiar a tomada de decisão por parte da Proteção Civil no planeamento de emergência em áreas suscetíveis à ocorrência de perigos geomorfológicos, com vista à mitigação de danos. Esta abordagem está em consonância com López-Vinielles *et al.* (2024), que destacam a avaliação dos potenciais impactos socioeconómicos como uma componente fundamental da gestão do risco, particularmente em regiões sujeitas a processos rápidos e intensos de urbanização e desenvolvimento de infraestruturas (Mileu *et al.*, 2025).

4. CONCLUSÕES

A metodologia de avaliação da exposição é universal e flexível, permitindo a utilização de dados de proveniência diversa e tendo em conta quaisquer infraestruturas ou equipamentos críticos existentes na área de estudo.

A categorização de elementos/infraestruturas críticas permite estruturar e sistematizar informação espacial relevante, facilitando a identificação de áreas com maior exposição e contribuindo para uma interpretação mais integrada dos impactos associados aos perigos geomorfológicos. Neste contexto, a cartografia da exposição às ADA constitui uma ferramenta útil de apoio à decisão no âmbito de programas como o Serviço de Gestão de Emergências do Copernicus (CEMS).

Contudo, a metodologia utilizada apresenta algumas limitações, nomeadamente: (i) a identificação das ADA está dependente da existência de pontos estáveis no que respeita ao seu comportamento refletor (*Persistent Scatterers*), pelo que estas não fornecem limites geográficos exatos, mas antes uma aproximação da extensão espacial dos processos de deformação; (ii) o InSAR mede apenas a componente LOS (linha de visão), reduzindo a sensibilidade a movimentos perpendiculares, nomeadamente no vetor Norte-Sul; (iii) o InSAR é adequado para a deteção de movimentos lentos, sendo pouco eficaz na deteção de fenómenos rápidos ou abruptos; e (iv) a técnica do InSAR tem limitações em função do uso e ocupação do solo, uma vez que a vegetação provoca perda de coerência temporal do sinal (Hanssen, 2001).

Agradecimentos

Este trabalho foi realizado no âmbito do projeto EGMS RASTOOL-DoS: European Ground Motion Risk Assessment Tools - Downstream Service (UCPM-2024-KAPP-PP – 101193210).

Referências

- Barra, A., Solari, L., Béjar-Pizarro, M., Monserrat, O., Bianchini, S., Herrera, G., Crosetto, M., Sarro, R., González-Alonso, E., Mateos, R.M., et al. (2017). A Methodology to Detect and Update Active Deformation Areas Based on Sentinel-1 SAR Images. *Remote Sensing*, 9, 1002. <https://doi.org/10.3390/rs9101002>.
- Costantini, M., Minati, F., Trillo, F., Ferretti, A., Novali, F., Østrem, J. O., et al. (2021). European Ground Motion Service: Large-Scale Systematic Monitoring of Ground Motion in Europe. *IEEE IGARSS 2021*, 3820–3823. <https://doi.org/10.1109/IGARSS47720.2021.9553499>.
- Crosetto, M., Crippa, B., Mróz, M., Cuevas-González, M., & Shahbazi, S. (2025). Applications based on EGMS products: A review. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 37, 101452.
- Hanssen, R. F. (2001). *Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis*. Kluwer Academic Publishers.
- López-Vinielles, J., Ezquerro, P., Béjar-Pizarro, M., Sarro, R., Cuevas-González, M., Barra, A., & Mateos, R. M. (2024). Potential socio-economic impacts of ground movements in the coastal municipalities of Spain: Insights from the supra-regional implementation of the European Ground Motion Service. *Ocean & Coastal Management*, 259, 107452. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2024.107452>.
- Mileu, N., Barra, A., Ezquerro, P., Oliveira, S. C., Garcia, R. A. C., Melo, R., Santos, P. P., Béjar-Pizarro, M., Monserrat, O., & Zêzere, J. L. (2025). ADAImpact tool: Toward a European ground motion impact map. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 14(10), 389. <https://doi.org/10.3390/ijgi14100389>.
- Palamà, R., Barra, A., Cuevas-González, M., Monserrat, O., & Crosetto, M. (2024). Ground Motion Classification from European Ground Motion Service Data Using Extreme Gradient Boosting. *IGARSS 2024*, Athens, Greece, pp. 10736–10739. <https://doi.org/10.1109/IGARSS53475.2024.10640768>.

Rede de Monitorização de Águas Subterrâneas do Empreendimento de Fins Múltiplos de Alqueva – Identificação de Áreas Vulneráveis e Otimização da Rede

Groundwater Monitoring Network of Alqueva Multipurpose Project – Identification of Vulnerable Areas and Network Optimisation

T. Pirocas¹ *, R. A. C. Garcia^{1,3}, M. Murteira², A. Ilhéu²

¹ Instituto de Geografia e Ordenamento do Território, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal

² EDIA – Empresa de Desenvolvimento e Infra-estruturas do Alqueva, S.A., Beja, Portugal

³ Centro de Estudos Geográficos, Laboratório Associado TERRA, Lisboa, Portugal

* tomaspirocas@edu.ulisboa.pt

RESUMO

O Empreendimento de Fins Múltiplos de Alqueva (EFMA) abrange cerca de 130 000 ha de regadio, aumentando a pressão sobre as águas subterrâneas. Este trabalho visa avaliar a vulnerabilidade dos aquíferos e otimizar a rede de monitorização da qualidade da água. A metodologia integra o modelo DRASTIC, análise multicritério, geoestatística e clusterização hidroquímica. Os resultados permitirão identificar zonas de maior risco e melhorar a representatividade espacial da monitorização.

Palavras-chave: Águas subterrâneas; Vulnerabilidade; DRASTIC; Monitorização; Alqueva; Geoestatística

Keywords: Groundwater; Vulnerability; DRASTIC; Monitoring; Alqueva; Geostatistics

1. INTRODUÇÃO

As águas subterrâneas representam mais de 95% das reservas de água doce exploráveis do planeta (Ramos, 2005), assumindo especial relevância em regiões semiáridas como o Alentejo, onde o recurso é estratégico para a agricultura, o abastecimento público e a sustentabilidade dos ecossistemas (Cervantes-Servin *et al.*, 2023). A intensificação agrícola e as alterações no uso do solo têm contribuído significativamente para o aumento das pressões sobre a qualidade destes recursos, sobretudo através de processos de poluição difusa, degradando a sua qualidade química (do Nascimento *et al.*, 2024).

O Empreendimento de Fins Múltiplos de Alqueva (EFMA) corresponde a cerca de 130 000 hectares de área irrigada e exerce a sua influência sobre aproximadamente 10 000 km², através do fornecimento de água para rega, da produção de energia e do apoio a diversas atividades económicas e sociais, constituindo o maior sistema integrado de gestão e distribuição de recursos hídricos em Portugal. Este empreendimento compreende 72 barragens, 2 078 km de condutas e canais e 48 estações elevatórias (EDIA, s.d.).

Segundo o Anuário Agrícola de Alqueva 2025 (EDIA, 2026) a implementação do sistema de rega do Alqueva, a partir de 2002, transformou profundamente o uso do solo regional, com um aumento de cerca de 50% das áreas irrigadas entre 2000 e 2018, dominadas atualmente pelo olival (cerca de 60% da área regada em 2025). Esta intensificação agrícola gerou novas pressões difusas sobre os aquíferos,

nomeadamente através da lixiviação de nitratos e pesticidas, comprometendo a qualidade das águas subterrâneas. O relatório de monitorização de 2024 confirma que as unidades de monitorização apresentam estado químico medíocre, com excedências de nitratos entre 47% e 73% dos pontos amostrados, e presença significativa do herbicida glifosato e seu metabólito ácido amino metil fosfónico (AMPA) e outros pesticidas (MONITAR, 2025).

Estudos recentes demonstram que áreas agrícolas intensivas apresentam maior vulnerabilidade à contaminação por nitratos, observando-se frequentemente uma correlação entre zonas de elevada vulnerabilidade e concentrações elevadas destes compostos (Wang *et al.*, 2024; Williams *et al.*, 2025). Adicionalmente, a presença de pesticidas e dos seus metabolitos em águas subterrâneas tem sido amplamente documentada, refletindo o impacto cumulativo das práticas agrícolas (Williams *et al.*, 2025).

Apesar da existência de redes de monitorização, subsistem limitações na sua capacidade de representar adequadamente a variabilidade espacial e identificar zonas críticas de contaminação.

Neste contexto, avaliar a vulnerabilidade intrínseca dos aquíferos e otimizar a rede de monitorização é essencial para apoiar a gestão sustentável deste recurso e do ordenamento do território destas regiões, garantindo que as zonas de maior risco estejam adequadamente representadas na rede de amostragem. A presente abordagem parte da hipótese de que a integração de índices de vulnerabilidade com dados hidroquímicos permitirá otimizar redes de monitorização de forma mais eficiente do que abordagens baseadas exclusivamente em critérios espaciais.

2. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo corresponde à região de influência do EFMA, localizada no sul de Portugal, abrangendo grande parte do Alentejo. O clima é mediterrânico semiárido, caracterizado por elevada variabilidade interanual da precipitação.

Do ponto de vista hidrogeológico, a região é dominada pelo Maciço Antigo Ibérico, constituído essencialmente por formações cristalinas com comportamento aquífero fissurado, coexistindo com sistemas aquíferos mais produtivos, como os Gabros de Beja, Moura–Ficalho e a Bacia de Alvalade (do Nascimento *et al.*, 2024).

A expansão do regadio alterou os padrões de recarga, de utilização e intensificou o uso de fertilizantes e pesticidas, aumentando o risco de degradação da qualidade das águas subterrâneas.

3. OBJETIVOS

O objetivo geral do trabalho consiste em avaliar a vulnerabilidade dos sistemas aquíferos do EFMA através da combinação de métodos de modelação espacial diferenciados, integrando os resultados obtidos na identificação de áreas vulneráveis como suporte à proposta de melhorias à rede de monitorização atual. Os objetivos específicos incluem: (i) compreender o enquadramento hidrogeológico e a estrutura da rede atual; (ii) aplicar o modelo DRASTIC como base da avaliação de vulnerabilidade; (iii) ajustar as ponderações através da análise multicritério; (iv) analisar padrões espaciais e temporais dos parâmetros hidroquímicos com recurso à geoestatística; (v) identificar agrupamentos hidroquímicos representativos; e (vi) fundamentar uma proposta de otimização da rede de monitorização.

4. METODOLOGIA

A metodologia assenta numa abordagem integrada e multidisciplinar, desenvolvida em cinco fases complementares. Na primeira fase, procede-se à recolha e tratamento dos dados hidrogeológicos, topográficos, climáticos e de uso do solo, provenientes da EDIA, do SNIRH, do LNEG e da IDRH (atual DGADR), que constituem a base para a aplicação do modelo DRASTIC.

O modelo DRASTIC (Aller *et al.*, 1987) avalia a vulnerabilidade intrínseca através da soma ponderada de sete parâmetros: profundidade do nível freático (D), recarga do aquífero (R), material do aquífero (A), tipo de solo (S), topografia (T), impacto da zona não saturada (I) e condutividade hidráulica (C), segundo a expressão $DRASTIC = 5D + 4R + 3A + 2S + 1T + 5I + 3C$.

Na segunda fase, a análise multicritério incorpora fatores adicionais como o uso do solo, ajustando as ponderações às condições específicas do EFMA e reduzindo a subjetividade das classificações originais conforme proposto em estudos recentes (Wang *et al.*, 2024; Williams *et al.*, 2025). Na terceira fase, técnicas geoestatísticas, incluindo variogramas e krigagem, são aplicadas para analisar a variabilidade espacial dos parâmetros hidroquímicos e avaliar a redundância e lacunas da rede de monitorização atual (Cervantes-Servin *et al.*, 2023). Na quarta fase, a clusterização hidroquímica agrupa os 103 pontos de monitorização em função da sua composição química, diferenciando contributos naturais de influências antrópicas, abordagem amplamente utilizada em estudos recentes de qualidade da água (Wang *et al.*, 2024). Numa quinta fase integrando os resultados propõe-se a reconfiguração da rede de monitorização, com base em critérios de risco, seguindo abordagens contemporâneas de gestão de recursos hídricos (Williams *et al.*, 2025).

5. RESULTADOS ESPERADOS

O presente trabalho encontra-se em fase de desenvolvimento. Neste contexto, numa fase prévia de preparação de informação, destaca-se a falta de uniformização de dados e/ou ausência de cartografia de base, a escala detalhada (e.g. geológica), que obriga a processos de colmatção e correção de informação fundamental, que, não obstante a aplicação de critérios científicos, poderão incrementar os níveis de incerteza associados aos resultados obtidos. A aplicação das fases descritas anteriormente irá permitir cartografar e identificar os contrastes espaciais da vulnerabilidade intrínseca (modelo DRASTIC) e específica (análise multicritério com uso do solo) para a totalidade da área do EFMA, identificando as zonas com maior suscetibilidade à contaminação. A análise geoestatística deverá evidenciar áreas com maior incerteza espacial (Cervantes-Servin *et al.*, 2023), onde a variância de krigagem é mais elevada, constituindo áreas prioritárias para reforço da monitorização. A clusterização hidroquímica, com base nos 103 pontos de monitorização do ano de 2024, permitirá identificar grupos de pontos com comportamentos geoquímicos distintos, possibilitando a racionalização da rede sem perda de representatividade. A integração de modelos de vulnerabilidade com dados hidroquímicos tem demonstrado melhorar a eficiência das redes de monitorização e apoiar estratégias de gestão mais eficazes (Wang *et al.*, 2024).

A proposta final de otimização deverá contemplar a realocação ou supressão de pontos redundantes e a adição de novos pontos em áreas de elevada vulnerabilidade e fraca cobertura espacial, contribuindo para uma rede mais eficiente e representativa das pressões exercidas pelo EFMA sobre as águas subterrâneas.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A abordagem metodológica integrada proposta neste estudo constitui um contributo científico relevante para a gestão sustentável das águas subterrâneas em contexto de intensificação agrícola. A conjugação do modelo DRASTIC com métodos multicritério, geoestatística e clusterização hidroquímica permite ultrapassar as limitações individuais de cada método, produzindo resultados mais robustos e adaptados às especificidades hidrogeológicas do EFMA. A metodologia reveste-se ainda de carácter replicável, podendo ser aplicada em outros sistemas de gestão hídrica em regiões semiáridas sujeitas a pressões agrícolas.

Agradecimentos

Os autores, agradecem à EDIA – Empresa de Desenvolvimento e Infraestruturas do Alqueva, S.A., pela disponibilização dos dados e pelo apoio prestado no âmbito do estágio realizado no Departamento de Ambiente e Ordenamento do Território; A investigação de R.A.C. Garcia é apoiada pela FCT - Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P, através da Unidade de Investigação UID/00295/2025 (DOI <https://doi.org/10.54499/UID/PRR/00295/2025>).

Referências

- Aller, L., Bennett, T., Lehr, J. H., Petty, R. J., & Hackett, G. (1987). DRASTIC: A standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings. U.S. Environmental Protection Agency.
- Cervantes-Servin, A. I., Arora, M., Peterson, T. J., & Pettigrove, V. Seasonal estimation of groundwater vulnerability. *Sci Rep* 13, 9720 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-36194-1>
- do Nascimento, T. V. M., de Oliveira, R. P., & Condesso de Melo, M. T. (2024). Impacts of large-scale irrigation and climate change on groundwater quality and the hydrological cycle: A case study of the Alqueva irrigation scheme and the Gabros de Beja aquifer system. *Science of The Total Environment*, 907, 168151. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2023.168151>
- EDIA – Empresa de Desenvolvimento e Infraestruturas do Alqueva, S.A. (s.d.). Empreendimento de fins múltiplos. <https://www.edia.pt/pt/o-que-e-o-alqueva/empreendimento-fins-multiplos/>
- EDIA - Empresa de Desenvolvimento e Infraestruturas do Alqueva, S.A. (2026). Anuário Agrícola de Alqueva 2025. <https://www.edia.pt/wp-content/uploads/2026/03/Anuario-Agricola-de-Alqueva-2025-2.pdf>
- MONITAR (2025). Programa Global para a Monitorização dos Recursos Hídricos Subterrâneos do EFMA – Fase de Exploração 2024. EDIA, S.A.
- Paralta, E. A., & Frances, A. P. (2005). Avaliação da Vulnerabilidade do Sistema Aquífero dos Gabros de Beja e Análise Crítica das Redes de Monitorização no Contexto da Directiva Quadro da Água.
- Ramos, C. (2005). Os recursos hídricos. In C. A. Medeiros (Ed.), *Geografia de Portugal* (Vol. 1, O ambiente físico, pp. 388–415). Círculo de Leitores.
- Thakur, J. K. (2015). Optimizing groundwater monitoring networks using integrated statistical and geostatistical approaches. *Hydrology*, 2(3), 148–175. <https://doi.org/10.3390/hydrology2030148>
- Wang, Z., Xiong, H., Zhang, F., & Ma, C. Integrated assessment of groundwater vulnerability in arid areas combining classical vulnerability index and AHP model. *Environ Sci Pollut Res* 31, 43822–43834 (2024). <https://doi.org/10.1007/s11356-024-34031-0>
- Williams, S. A., Megdal, S. B., Zuniga-Teran, A. A., Quanrud, D. M., & Christopherson, G. (2025). Mapping Groundwater Vulnerability in Arid Regions: A Comparative Risk Assessment Using Modified DRASTIC Models, Land Use, and Climate Change Factors. *Land*, 14(1), 58. <https://doi.org/10.3390/land14010058>

Avaliação da coocorrência de erosão laminar e em ravinas numa área de montanha afetada por incêndios florestais: um caso de estudo no Centro de Portugal

Assessing the co-occurrence of sheet and gully erosion in a wildfire-affected mountain area: A case study from Central Portugal

B. Martins^{1*}, C. Pinheiro², A. Nunes¹

¹ Universidade de Coimbra, Departamento de Geografia e Turismo, CEGOT, Coimbra, Portugal

² Universidade do Minho, Departamento de Geografia, Centro de Estudos de Comunicação e Sociedade, Braga, Portugal

* bruno.martins@uc.pt

RESUMO

A erosão do solo é uma ameaça crescente, exacerbada por incêndios florestais que alteram as propriedades hidrológicas e geomorfológicas do terreno. Este estudo avalia a erosão laminar e em ravinas na bacia do rio Alva (Centro de Portugal), afetada pelos incêndios de 2017. Utilizou-se o modelo InVEST-SDR para mapear a erosão laminar e a fotointerpretação para identificar as ravinas. Os resultados indicam que as perdas de solo ultrapassam frequentemente o limiar crítico das 10 t/ha/ano. A acumulação de fluxo revelou-se o fator mais decisivo para ambos os processos, embora o declive seja mais crítico para a erosão laminar e o uso do solo para a formação de ravinas.

Palavras-chave: erosão laminar; ravinas; incêndios florestais; produção de sedimentos; ambiente mediterrâneo.

Keywords: sheet and gully erosion; wildfires; erosion drive factors; sediment production; Mediterranean environment.

1. INTRODUÇÃO

A perda de solo por erosão hídrica é reconhecida como uma das principais ameaças aos recursos edáficos à escala global. Este processo é particularmente crítico em ambientes mediterrâneos, como Portugal, onde a conservação do solo é historicamente complexa devido ao contexto climático e à pressão das atividades humanas (Martins et al., 2025). Para além disto, os incêndios florestais alteram a dinâmica hidrológica e aceleram os processos erosivos, especialmente quando seguidos por episódios de precipitação intensa e concentrada (Bento-Gonçalves, 2021).

A utilização de modelos empíricos como a Equação Universal de Perda de Solo Revisitada (RUSLE) é amplamente aceite para estimar a perda de solo (Alewell et al., 2019). No entanto, a aplicação do modelo InVEST-SDR permite uma análise baseada na conectividade hidrológica da bacia, embora apresente limitações ao não contabilizar a erosão por ravinamento (Sharp et al., 2026). Assim, a presente investigação estabelece três objetivos fundamentais: (i) mapear a erosão laminar através do modelo InVEST-SDR; (ii) identificar áreas de coocorrência entre erosão laminar e ravinamentos; e (iii) determinar os principais fatores condicionantes de ambos os processos erosivos na bacia do rio Alva. Ao melhorar a compreensão sobre os processos erosivos, este estudo visa apoiar uma gestão de solos mais eficaz e um planeamento sustentável do uso do solo, reduzido a perda e degradação do solo.

2. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

2.1 Localização e Caracterização da Área de Estudo

Com uma área aproximada de 2739,2 ha, a área de estudo localiza-se no município de Oliveira do Hospital (Centro de Portugal) e integra a bacia hidrográfica do rio Alva. O clima é Mediterrâneo (Cs), oscilando a precipitação anual entre os 1100-1300mm. Insere-se na Zona Centro-Ibérica do Maciço Ibérico, sendo dominada por granitos porfíricos de grão grosseiro. Trata-se de uma área caracterizada estruturalmente pela densa rede de falhas e fraturas que terá acelerado os processos de alteração da rocha, resultando na presença de profundos mantos de alteração, que frequentemente ultrapassam os cinco metros de espessura. Predominam os Cambissolos (cerca de 50% da área), solos de textura média com profundidade entre 25-50 cm, e os Antrossolos (14%), caracterizados por texturas grosseiras e elevada permeabilidade.

2.2 Dados e métodos

Os parâmetros topográficos foram derivados de um Modelo Digital de Elevação (MDE), gerado a partir de curvas de nível com equidistância de 10 m. A partir do MDE, extraiu-se: altitude (A), declive (S), exposição das vertentes (As), curvatura (C) e acumulação de fluxo (FA). A severidade do incêndio de outubro de 2017 foi determinada através do processamento de imagens Landsat 8 OLI/TIRS, comparando os períodos pré-fogo e pós-fogo. Utilizou-se o *Normalized Burn Ratio* (NBR), calculado com base nas bandas do infravermelho próximo (NIR) e infravermelho de onda curta (SWIR).

A identificação e a vetorização das ravinas foi realizada com recurso a ortofotomapas de 2018 (resolução espacial de 25 cm), disponibilizados pela Direção-Geral do Território. O mapeamento foi executado em ambiente SIG (software ArcGIS Pro), permitindo a identificação da largura e comprimento das ravinas.

Para a estimativa da erosão laminar, utilizou-se o modelo *Sediment Delivery Ratio* (SDR) do software InVEST (Sharp et al., 2026), que integra a Equação Universal de Perda de Solo Revisitada (RUSLE). Para tal, a erosividade (Fator R) foi calculada através da equação de Hurni (1985) com base na precipitação total anual (em milímetros, para o período 1931-1960, disponibilizada pelo Atlas do Ambiente). O fator Fator K (Erodibilidade) foi obtido a partir da Carta de Solos e Aptidão das Terras da Zona Interior Centro. Os Fatores C e P foram adaptados de acordo com as recomendações técnicas para o contexto português, utilizando a Carta de Uso e Ocupação do Solo (COS) de 2022. O Fator LS é calculado automaticamente pelo modelo com base na conectividade hidrológica e nos dados do MDE.

Para identificar os fatores de controlo da erosão laminar e da formação de ravinas, foram criadas duas amostras de pontos: 1000 pontos para a erosão laminar (não coincidentes com ravinas) e 100 pontos para a formação de ravinas. Aplicou-se a Regressão Múltipla *Stepwise* (SMR) para analisar a influência de variáveis como altitude, declive, curvatura, FA, severidade do incêndio e uso do solo em ambos os processos erosivos.

3. RESULTADOS

3.1 Variabilidade dos Fatores Geoambientais

A área de estudo apresenta uma amplitude altimétrica entre os 200 e os 800 metros, onde são frequentes vertentes de declives acentuados. As formas convexas dominam o setor superior das vertentes, particularmente a norte e sudoeste. Relativamente ao FA, os mais valores elevados estão presentes nos canais principais dos cursos de água, em especial nos setores próximo dos talwegues no eixo central da bacia.

A erosividade (*fator R*) varia entre 610 e 722 MJ.mm/(ha⁻¹ h⁻¹), sendo mais elevada a montante. O incêndio de outubro de 2017, de severidade moderada a baixa, precedeu a tempestade Ana, que causou precipitação intensa em dezembro desse ano. Atualmente, o território dominado por matos (60%) e florestas (18%), apresenta valores de erodibilidade (*fator K*) elevados (0,019).

3.2 Avaliação da Perda de Solo (Erosão Laminar)

A aplicação do modelo InVEST-SDR estimou uma perda de solo anual entre 0 e 849 t/ha/ano, com uma média de 1,3 t/ano para a área da bacia hidrográfica do rio Alva. As taxas mais críticas (>100 t/ha/ano) localizam-se nos setores central e nordeste, onde o relevo é mais declivoso, e próximo de canais de drenagem de ordem superior (Figura 1).

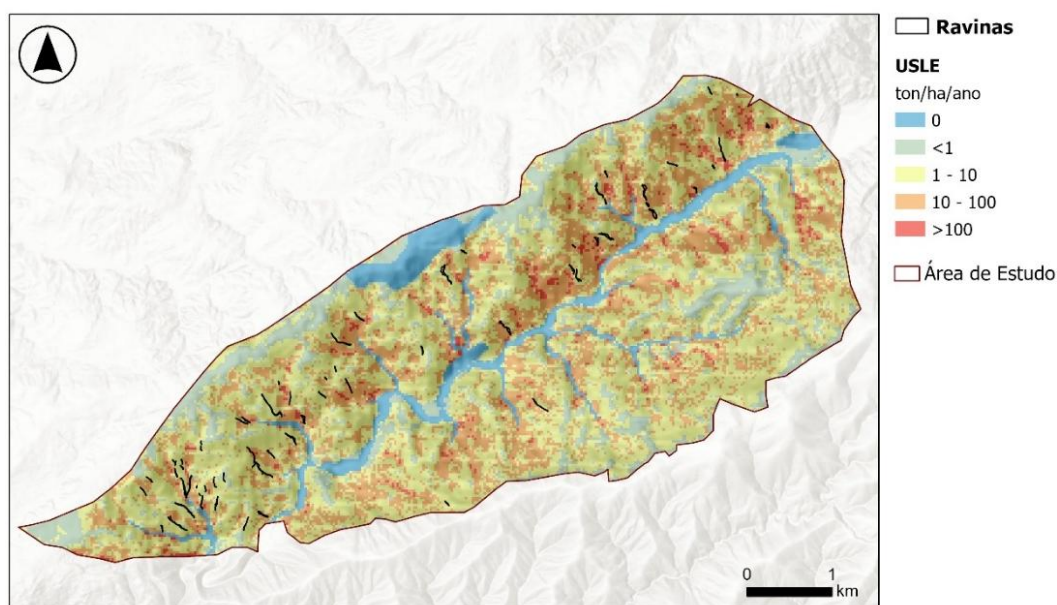


Figura 1. Coocorrência de erosão laminar (USLE) e de ravinamento.

O modelo da Regressão Múltipla *Stepwise* (SMR) explica 66,5% da variância da erosão laminar a partir de três modelos (Quadro 1). Os valores mais elevados de erosão laminar correspondem a áreas com elevada FA, declives entre 28° e 31° e florestas afetadas por incêndios.

Quadro 1. SMR relativa à erosão laminar

Modelo	Variáveis	R ² parcial	R ² do modelo	Não estandardizado	Estandarizado	t	p
1	FA	0,549	0,549	117,590	0,549	19,733	<0,001
2	FA	0,068	0,617	123,903	0,579	21,953	<0,001
	S			154,653	0,283	10,745	<0,001
3	FA	0,048	0,665	5,387	0,554	22,031	<0,001
	S			13,765	0,312	12,392	<0,001
	LUC			2,631	-0,250	-9,932	<0,001

Nota: As seguintes covariáveis foram consideradas, mas não incluídas: curvatura, altitude, orientação das vertentes, espessura do solo, textura do solo, permeabilidade do solo e severidade do incêndio. FA corresponde à acumulação de fluxos, S ao declive e LUC ao uso/ocupação do solo.

3.3 Fatores de controlo da erosão por ravinamento

Identificaram-se 66 ravinas com uma largura média que varia entre 1,1m e 11,3m, e um comprimento médio de 105 m. A coocorrência de ravinas e erosão laminar estimada pela USLE é frequente em área onde a perda de solo excede as 10 t/ha/ano. A SMR explica 67,7% da variância relativa à presença de ravinas, destacando a FA como o fator mais determinante (48,2%), seguida pelo uso do solo (12%),

declive e curvatura (ambos com 2%). As ravinas são mais frequentes em áreas de convergência de fluxo, vertentes declivosas (28-31°) e em vertentes convexas, em particular, em áreas florestais afetadas por incêndios (Quadro 2).

Quadro 2. relativa à erosão por ravinamento

Modelo	Variáveis	R ² parcial	R ² do modelo	Não estandardizado	Standardizado	t	p
1	FA	0,482	0,482	105,244	0,482	13,565	<0,001
2	FA	0,118	0,600	108,613	0,497	14,850	<0,001
	LUC			-41,386	-0,359	-10,712	<0,001
3	FA	0,058	0,658	117,478	0,554	0,538	<0,001
	LUC			-39,881	0,312	-0,346	<0,001
	S			137,262	-0,250	0,272	<0,001
4	FA	0,019	0,677	106,462	0,487	14,930	<0,001
	LUC			-40,054	-0,347	-11,236	<0,001
	S			125,901	0,249	7,913	<0,001
	c			-1053,988	-0,170	-5,264	<0,001

Nota. As seguintes covariáveis foram consideradas, mas não incluídas: altitude, exposição das vertentes, espessura do solo, textura do solo, permeabilidade do solo e severidade do incêndio. FA corresponde à acumulação de fluxos, LUC ao uso/ocupação do solo, S ao declive e C à curvatura.

4. DISCUSSÃO E CONCLUSÃO

A erosão hídrica é reconhecida como uma das ameaças mais críticas aos recursos edáficos à escala global. Na área de estudo, os resultados confirmam que a perda de solo ultrapassa frequentemente o limiar crítico de 10 t/ha/ano. A FA revelou-se um fator determinante tanto para a erosão laminar como para a formação de ravinas, indicando que uma escorrência mais competente possui energia necessária para mobilizar elementos mais grosseiras e incidir verticalmente no solo. Este processo é exacerbado pela presença de mantos de alteração profundos, facilitando a instalação e desenvolvimento de ravinas profundas e extensas (Martins et al., 2025).

A ação dos incêndios florestais é central na explicação de uma morfodinâmica atual muito acelerada (Bento-Gonçalves, 2021). Embora o declive seja um dos fatores topográfico mais críticos para a erosão laminar (especialmente entre os 28° e 31°), o uso do solo revelou-se mais decisivo para a formação de ravinas, uma vez que a ausência de coberto vegetal no período pós-fogo expõe diretamente o solo à erosividade, particularmente aquando das primeiras chuvas de outono.

A coocorrência espacial entre a erosão laminar e ravinamentos sugere que a primeira atua frequentemente como precursor da erosão concentrada (Poesen et al., 2003). A complexidade desta interação demonstra que o controlo da erosão em áreas de montanha não depende apenas do declive, mas da forma como a conectividade hidrológica é gerida após perturbações severas, em particular, associadas aos incêndios florestais. Com efeito, é urgente a implementação de medidas de mitigação de erosão, sobretudo em contexto pós-incêndio.

Referências

- Alewel, C., Borrelli, P., Meusburger, K., & Panagos, P. (2019). Using the USLE: Chances, challenges and limitations of soil erosion modelling. *International Soil and Water Conservation Research*, 7(3), 203–225. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2019.05.004>.
- Hurni, H. (1985). Erosion-Productivity-Conservation system in Ethiopia. IV International Conference on Soil Conservation, Maracay, Venezuela.
- Martins, B., Pinheiro, C., & Nunes, A. (2025). Assessing the co-occurrence of sheet and gully erosion in a wildfire-affected mountain area: A case study from Central Portugal. *Geomorphology*, 109980.

- Poesen, J., Nachtergaele, J., Verstraeten, G., & Valentin, C. (2003). Gully erosion and environmental change: importance and research needs. *Catena*, 50(2-4), 91-133.
- Sharp, R., Douglass, J., Wolny, S., Arkema, (...) & Wyatt, R. (2026). InVEST Sediment Delivery Ratio (SDR) Model. In *InVEST User's Guide*. The Natural Capital Project, Stanford University, University of Minnesota, Stockholms Resilienscentrum, & World Wildlife Fund.

A base de dados RISCAR: contributo para o conhecimento histórico de ocorrências de cheias e inundações, secas e galgamentos costeiros em Moçambique

The RISCAR database: a contribution to the historical knowledge on floods, droughts and coastal overtopping in Mozambique

H. Nganhane^{1,2}, P.P. Santos^{3,4*}, A.O. Tavares², G. Dge-Dge⁵

¹ Faculdade de Ciências Exactas e Tecnológicas, Universidade Púnguè, Moçambique

² Departamento de Ciências da Terra, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal

³ Centro de Estudos Geográficos - Instituto de Geografia e Ordenamento do Território, Universidade de Lisboa; Lisboa, Portugal

⁴ Laboratório Associado TERRA, Lisboa, Portugal

⁵ Faculdade de Ciências da Terra e Ambiente, Universidade Pedagógica, Maputo, Moçambique

* pmpsantos@edu.ulisboa.pt

RESUMO

O presente trabalho tem por objetivo apresentar a base de dados RISCAR, uma base de dados que cobre ocorrências de cheias e inundações, secas e galgamentos costeiros em todo o território de Moçambique, para o período 1926-2021. Procedeu-se à apresentação das fontes documentais, campos da base de dados e análise preliminar de resultados. A RISCAR tem o potencial para auxiliar no conhecimento dos eventos com consequências danosas, identificando as áreas historicamente críticas e a sua relação com os contextos de exposição e vulnerabilidade, e assim apoiar na definição de mecanismos de prevenção, monitorização e planeamento territorial.

Palavras-chave: base de dados; Moçambique; cheias e inundações; secas; galgamentos costeiros.

Keywords: database; Mozambique; floods; droughts; coastal overtopping.

1. INTRODUÇÃO

A avaliação e gestão de riscos associados a processos hidro-meteorológicos em Moçambique requer o conhecimento histórico das perdas verificadas, seja em grandes eventos seja em ocorrências mais frequentes de menor impacto. Neste trabalho, procede-se à apresentação da base de dados RISCAR, nomeadamente à sua concetualização, estruturação em campos, fontes consultadas e primeiros resultados.

Os riscos naturais devem ser compreendidos através da relação entre perigosidade, exposição e vulnerabilidade, sendo fortemente influenciados pela ocupação humana do território e pelas alterações climáticas. A crescente frequência e severidade dos fenómenos extremos na África Austral, associada à expansão urbana desordenada, à vulnerabilidade socioeconómica e à pressão sobre os ecossistemas (CDKN e ACDI, 2022), reforça a necessidade de sistemas de monitorização e bases de dados capazes de apoiar processos de planeamento territorial e proteção civil.

A inexistência de bases de dados históricas estruturadas limita a capacidade de compreender a recorrência dos fenómenos, identificar áreas vulneráveis e apoiar políticas de prevenção e redução do risco de desastres. Neste sentido, a RISCAR surge como um instrumento de apoio científico e técnico à gestão do risco, permitindo associar a distribuição espacial e temporal dos processos físicos aos seus impactos.

A RISCAR cobre os processos hidro-meteorológicos de cheias e inundações, galgamentos costeiros e secas, processos que nas últimas décadas têm provocado elevados impactos humanos, materiais e ambientais em Moçambique (Nganhane *et al.*, 2026). A área de abrangência da RISCAR corresponde a todo o território daquele país, particularmente suscetível aos perigos de natureza hidro-meteorológica - devido à sua localização geográfica, à extensa linha de costa do oceano Índico e à presença de grandes bacias hidrográficas internacionais – a que se junta a elevada vulnerabilidade da sua população e estruturas territoriais.

2. METODOLOGIA

A metodologia de construção da base de dados RISCAR baseou-se numa combinação de fontes documentais, hemerográficas e institucionais, onde a definição dos campos adotados se baseou noutras bases de dados, como seja a EM-DAT e a DesInventar, tendo os mesmos sido adaptados à realidade moçambicana. Foram utilizados jornais de circulação nacional - Jornal de Notícias, Jornal Domingo, Diário de Moçambique e Jornal O País -, relatórios oficiais, documentos de organizações não-governamentais, boletins institucionais e dados produzidos por entidades governamentais ligadas à gestão do risco e meteorologia. O período coberto pela pesquisa é o de 1926 a 2021 (Tabela 1). A utilização de jornais revelou-se particularmente importante para recuperar informação histórica detalhada sobre ocorrências locais de desastres, permitindo identificar datas, locais, danos humanos e materiais, bem como fatores desencadeantes dos eventos.

Tabela 1. Critérios e as fontes que alimentaram a base de dados RISCAR

Critérios de registo (não acumulativo)	Fonte de Informação	Cobertura	Período
Qualquer tipo de perda – humana (como morte e desalojamento) ou apenas material (como corte de estradas, danos em equipamentos coletivos, etc.); Relato de evacuação; Impactos nas residências e infraestruturas; Intervenção do governo para assistência; Relato de bolsa de fome	1. Jornal Notícias	Nacional	Desde 1926
	2. Diário de Moçambique	Nacional (com maior cobertura da Zona centro)	Desde 1951
	3. Jornal O País	Nacional	Desde 2005
	4. Semanários	Nacional	Desde 1980
	5. Jornal Domingo	Nacional	Desde 1980
	6. Relatórios do Governo	Nacional/Provincial	Desde 1999
	7. INGD*	Nacional/Provincial	Desde 1999
	8. DNGRH**		

* INGD – Instituto Nacional de Gestão e Redução de Riscos de Desastres; ** DNGRH – Direção Nacional de Gestão de Recursos Hídricos

A recolha e organização da informação seguiram várias etapas metodológicas que incluíram a seleção das fontes, classificação dos eventos, georreferenciação das ocorrências e criação de atributos relacionais. A base de dados foi concebida para integrar informação espacial e temporal sobre cheias e inundações, galgamentos costeiros e secas. Entre os principais atributos registados encontram-se: data da ocorrência, localização administrativa, tipo de processo natural, fator desencadeante, número de mortos, feridos, desalojados e afetados, danos em habitações, escolas, infraestruturas sociais e vias de comunicação. A estrutura da base permitiu igualmente classificar os fenómenos segundo critérios

de magnitude, frequência e severidade, possibilitando análises comparativas e representação cartográfica dos impactos.

A metodologia incluiu ainda um processo de georreferenciação das ocorrências através de elementos espaciais associados aos distritos e províncias afetadas. A integração da dimensão espacial permitiu mapear a distribuição dos eventos no território nacional e identificar áreas de maior recorrência de desastres associados a processos hidro-meteorológicos.

3. SÍNTESE DA ANÁLISE PRELIMINAR

A investigação evidencia que as cheias e inundações têm um longo histórico no país, sobretudo nas grandes bacias hidrográficas, como as bacias dos rios Limpopo, Zambeze, Save e Púngué. Estes eventos são frequentemente desencadeados por precipitação intensa associada a ciclones tropicais e sistemas de baixa pressão, causando perdas humanas, destruição de infraestruturas e deslocação de populações. A análise temporal demonstra aumento do número de eventos registados nas últimas décadas, tendência relacionada tanto com o crescimento populacional e urbano em áreas perigosas como com a maior cobertura mediática e institucional dos desastres. A base permitiu também distinguir diferentes tipologias de cheias e inundações, incluindo cheias rápidas, lentas e inundações urbanas, bem como identificar os fatores desencadeantes mais frequentes, sobretudo precipitação extrema e ciclones tropicais.

As zonas costeiras moçambicanas apresentam elevada suscetibilidade aos galgamentos costeiros, especialmente graves nas cidades costeiras como Beira e Nacala, onde os ciclones tropicais e as tempestades oceânicas provocam frequentemente inundação de áreas urbanas e destruição de infraestruturas (Fig. 1). A cidade da Beira surge como uma das áreas mais afetadas, tendo a BD RISCAR registo de 45 ocorrências espacialmente distintas, agrupadas em 17 eventos de tempestades tropicais, um cenário que se tenderá a agravar considerando os processos erosivos e as projeções de subida do nível médio do mar.

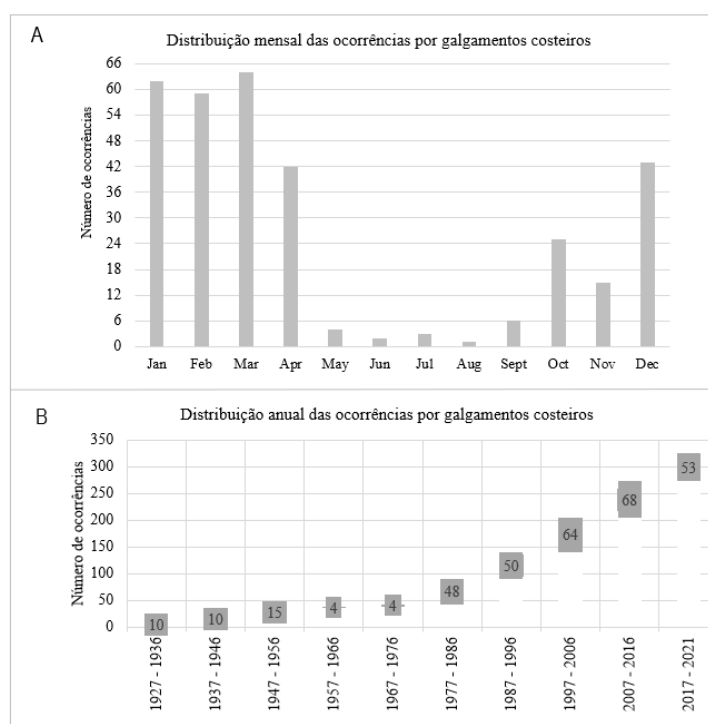


Figura 1. Ocorrências de galgamentos costeiros registadas na RISCAR e suas dinâmicas temporais.

O registo histórico dos eventos de seca demonstrou que este processo constitui um dos maiores problemas ambientais e humanitários de Moçambique, sobretudo nas regiões sul e centro do país. A ocorrência recorrente de períodos prolongados de défice de precipitação afeta a agricultura, o abastecimento de água e a segurança alimentar. A investigação identificou referências históricas de grandes secas desde o século XIX, incluindo os episódios severos das décadas de 1980 e 1990, responsáveis por deslocações populacionais e crises alimentares. O contexto climático moçambicano, marcado pela variabilidade interanual da precipitação e pela influência de fenómenos atmosféricos regionais, torna o país altamente suscetível à ocorrência simultânea de cheias e inundações e secas em diferentes regiões. As províncias historicamente mais afetadas são Gaza, Inhambane, Manica e Sofala. A distribuição temporal mostra ciclos de seca prolongada associados à variabilidade climática regional. Os impactos registados incluem perdas agrícolas, insegurança alimentar, deslocações populacionais e danos socioeconómicos significativos.

4. CONCLUSÕES

As secas apresentam efeitos mais prolongados e menos visíveis do que as cheias e inundações, mas possuem elevado impacto estrutural sobre as comunidades rurais dependentes da agricultura de subsistência. Os resultados relativos às perdas e danos mostram que as cheias e inundações e os galgamentos costeiros foram os processos responsáveis pelos maiores números de fatalidades, pessoas afetadas e destruição de infraestruturas. A análise temporal evidencia agravamento dos impactos nas últimas décadas, particularmente em áreas urbanas e costeiras densamente povoadas. A RISCAR, quando comparada com o registo nacional em bases internacionais como a EM-DAT, demonstra maior detalhe espacial e temporal na informação recolhida em Moçambique.

Em síntese, a base de dados RISCAR constitui um importante contributo científico e técnico para o conhecimento dos riscos associados a processos hidro-meteorológicos em Moçambique. O registo sistemático e georreferenciado de ocorrências permite compreender melhor a dinâmica histórica dos desastres, identificar áreas críticas e apoiar estratégias de gestão do risco e adaptação às alterações climáticas, em reforço ao desenho de mecanismos de prevenção, monitorização e planeamento territorial. Futuramente, para além de cheias e inundações, galgamentos costeiros associados a ciclones tropicais e secas, a base de dados poderá incluir outro tipo de processos, que partilhem fatores desencadeantes, como os movimentos de massa em vertentes.

Agradecimentos

PPS foi apoiado por fundos públicos portugueses através da FCT - Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P., pela Unidade de Investigação UID/00295/2025 (DOI <https://doi.org/10.54499/UID/PRR/00295/2025>).

Referências

- CDKN & ACDI (2022). Sexto relatório do IPCC: Impactos, opções de adaptação e áreas de investimento para uma África Austral resiliente às mudanças climáticas – Ficha Informativa: África Austral. Climate and Development Knowledge Network, African Climate and Development Initiative.
- Nganhane, H. V., Tavares, A. O., Santos, P. P. & Dge-Dge, G. (2026). Natural hazard impacts database for Mozambique using information from 1926 to 2021: knowing the past to plan for a resilient future. *Natural Hazards*, 122, 436. <https://doi.org/10.1007/s11069-025-07745-8>.

O evento de cheia em Alcácer do Sal em janeiro e fevereiro de 2026: análise de fatores desencadeantes e agravantes e reconstituição da área inundável

The flood event in Alcácer do Sal in January and February of 2026: analysis of triggering and aggravating factors and reconstitution of the flooded area

G. Batista¹, J. Caetano¹, M. Drummond¹, S. Martins do Ó¹, P.P. Santos^{2,3 *}

¹ Instituto de Geografia e Ordenamento do Território, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal

² Centro de Estudos Geográficos - Instituto de Geografia e Ordenamento do Território, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal

³ Laboratório Associado TERRA, Lisboa, Portugal

* pmpsantos@edu.ulisboa.pt

RESUMO

A precipitação prolongada ocorrida entre o outono de 2025 e fevereiro de 2026 desencadeou processos extremos hidrogeomorfológicos em Portugal continental. A bacia do Sado registou cheias excecionais, por uma conjugação de fatores desencadeantes e agravantes, afetando gravemente Alcácer do Sal. Este trabalho procura descrever as condições antecedentes e ocorridas durante as cheias, apresentando cartografia das áreas inundáveis pelo método hidrogeomorfológico e de reconstituição histórica. Procedeu-se a uma análise da precipitação, do armazenamento nas barragens, dos caudais e dos níveis de maré, numa lógica de investigação forense de desastres aplicada à caracterização da suscetibilidade à cheia.

Palavras-chave: *cheia; fatores desencadeantes; fatores agravantes; Alcácer do Sal; reconstituição histórica.*

Keywords: *flood; triggering factors; aggravating factors; Alcácer do Sal; historical reconstitution.*

1. INTRODUÇÃO

As cheias constituem um dos fenómenos naturais mais frequentes e com maior impacto em Portugal, afetando de forma significativa populações, infraestruturas e atividades económicas. A análise destes eventos é bastante importante num contexto de crescente ocupação humana de áreas inundáveis e de alterações climáticas, que tendem, por um lado, a intensificar a frequência e magnitude de fenómenos extremos e, por outro, a aumentar a exposição e o potencial de perda direta e indireta nas áreas urbanas expostas e áreas envolventes.

A reconstituição de eventos recentes permite identificar padrões de funcionamento do sistema hidrológico, avaliar a influência de diferentes fatores e melhorar a capacidade de resposta a futuras ocorrências.

O presente trabalho centra-se na reconstituição do evento de cheia ocorrido em janeiro e fevereiro de 2026 em Alcácer do Sal, procurando compreender de que forma interagiram os fatores climatológicos desencadeantes e os fatores agravantes no aumento do caudal do rio Sado. A análise desenvolvida insere-se numa perspetiva integrada, de avaliação espacial e temporal, articulando diferentes tipos de informação e métodos, de forma a obter uma visão mais completa do evento.

2. ÁREA DE ESTUDO

Inserida no Alentejo Litoral, Alcácer do Sal encontra-se às margens do rio Sado, que constitui a sétima maior bacia hidrográfica de Portugal, com uma área de drenagem de cerca de 7.600 km², caracterizando-se ainda por apresentar uma forte presença de barragens, destacando-se as do Alvito, Campilhas, Monte da Rocha, Pego do Altar, Roxo e Vale do Gaio, o que torna a gestão das descargas destas infraestruturas durante eventos de precipitação extrema um fator determinante que influencia o nível do caudal do Sado. A cidade está localizada no troço inferior desta bacia, numa zona de transição para o estuário do Sado, onde convergem vários fatores que influenciam a suscetibilidade e a perigosidade a cheias. O fundo de vale plano e amplo que caracteriza o setor vestibular do rio Sado aumenta a suscetibilidade para a ocorrência de cheias e amplifica o efeito das marés, em interação com o caudal fluvial, podendo agravar os níveis de inundação na área urbana.

3. METODOLOGIA

A análise recorreu a dados recolhidos ao nível da bacia hidrográfica para o período entre 1-jan-2026 e 15-fev-2026, concretamente, a precipitação diária em seis estações meteorológicas da rede do Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (SNIRH), complementadas com os valores diários registados na Reanálise do ECMWF, Quinta Geração (ERA5), às quais se aplicou o método de interpolação de krigagem para os dias 1 a 6 de fevereiro (de modo a cobrir o dia de maior ponta de cheia, 4 de fevereiro). Foram recolhidos para o mesmo período (1-jan a 15-fev) os valores da cota de albufeira de cinco barragens – Monte da Rocha, Campilhas, Vale do Gaio, Alvito e Odivelas. No caso de Alcácer do Sal, recolheram-se alturas hidrométricas (caudal instantâneo indisponível) para a estação hidrométrica de Alcácer do Sal do SNIRH (23F/01H) e os níveis de maré do Porto de Setúbal, do Instituto Hidrográfico. Preparou-se ainda um mosaico de parcelas do modelo digital de terreno do LiDAR com 0,5 m de resolução da Direção-Geral do Território, com a finalidade de auxiliar na identificação dos limites máximos de inundação em ambas as margens, por inquirição com recurso à ferramenta QFIELDS. Como resultado pretendido, identifica-se: a) cartografia da área inundável no dia de maior caudal de ponta de cheia – a comparar com a cartografia dos períodos de retorno de 20, 100 e 1000 anos constantes no Plano de Gestão dos Riscos de Inundações na ARPSI Alcácer do Sal; b) a compreensão do papel dos fatores desencadeantes e agravantes na caracterização da relação entre pontas de cheia, fatores humanos e hidrogeográficos.

4. RESULTADOS PRELIMINARES

Relativamente à precipitação acumulada, tomando como exemplo a área a montante da barragem de Alvito (Figura 1), é interessante anotar que até meados do mês de janeiro os valores foram reduzidos (37,2 mm de 1 a 15-jan) e, desde então, o seu total acumulado aumentou de forma significativa (276,3 mm de 16-jan a 15-fev). Associado a este fator, sabe-se por inquirição junto dos Serviços Municipais de Proteção Civil e pelos elementos multimédia consultados, que foi no dia 27 de janeiro de 2026 que se registou o primeiro momento de cheia em Alcácer do Sal. Posteriormente, os valores acumulados registam forte crescimento nos dias 4 e 5 de fevereiro. Para além da persistência da precipitação – sem valores diários excecionais nem em janeiro nem em fevereiro, pois os dois valores diários mais elevados ocorreram nas estações de Viana do Alentejo e de Azinheira de Barros, respetivamente, com 47,4 mm e 47,9 mm –, parecem ter tido papel relevante dois outros fatores: as elevadas preias-mar e a descarga das barragens.

O papel da descarga das barragens é de difícil apreensão unicamente pelos valores das cotas das albufeiras. Os dados do SNIRH evidenciam contudo que em todas elas – com exceção de algumas

leituras diárias que parecem consistir em falhas instrumentais em Odivelas – o nível pleno de armazenamento (NPA) foi ultrapassado e, em alguns casos como exemplificado na Figura 1 para Alvito, o próprio nível máximo de cheia (NMC) foi ultrapassado.

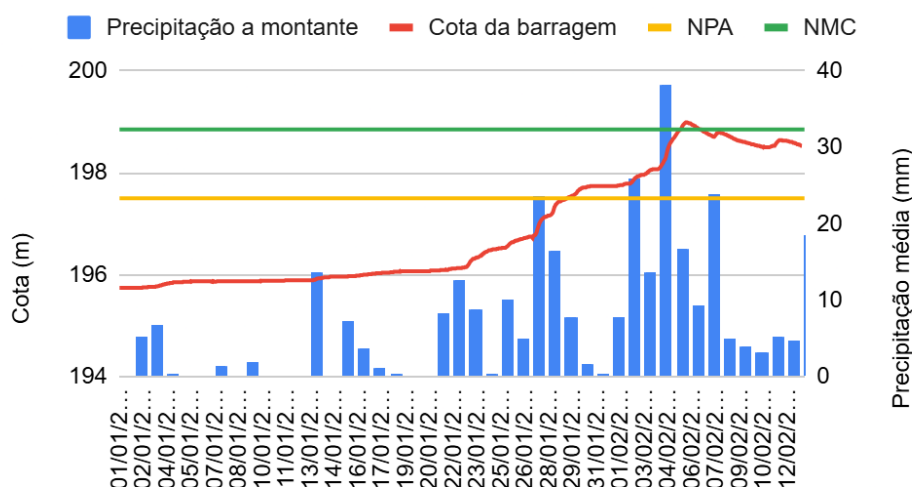


Figura 1. Relação entre a precipitação diária e a cota da albufeira na barragem de Alvito.

Quanto às marés, na noite de 27 de janeiro por exemplo, o estuário do Sado encontrava-se em preia-mar às 21h54, com uma altura de 2,77 metros, de acordo com as previsões expressas nas tabelas de marés do Instituto Hidrográfico para a Barra de Setúbal. No dia seguinte, a 28 de janeiro, registou-se uma nova maré cheia às 23h18, ainda mais elevada, com 2,87 metros. Contudo, no dia 4 de fevereiro, conjugado com a precipitação, ocorreram duas preias-mar astronómicas ainda mais elevadas, de 3,7 m e 3,9 m, que se conjugaram com a manutenção de valores diários elevados de precipitação, resultando em níveis hidrométricos superiores a 5 m em Alcácer do Sal (Figura 2).

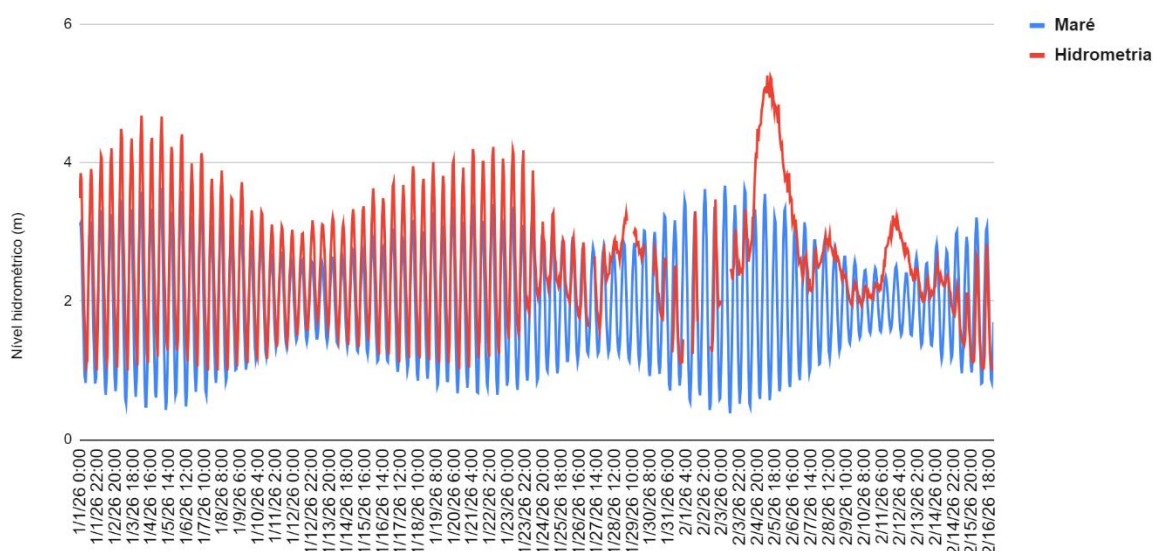


Figura 2. Relação entre os níveis de maré astronómica previstos para o Porto de Setúbal (azul) e os níveis hidrométricos registados na estação hidrométrica de Alcácer do Sal (vermelho), entre o início de janeiro e 16 de fevereiro de 2026.

O trabalho de campo constituiu um contributo fundamental para a obtenção dos dados utilizados na análise, tendo sido realizadas três saídas de campo à área de estudo. Neste âmbito, foram identificadas

diversas evidências físicas da cheia em diferentes pontos de Alcácer do Sal, nomeadamente marcas de nível de água em fachadas de edifícios, vestígios no interior de habitações e acumulação de detritos e vegetação. Estas evidências permitiram determinar a altura máxima atingida pela água, registando-se valores que, em alguns casos, ultrapassam os dois metros, sobretudo nas áreas mais próximas do leito do rio. Os pontos de cota assim obtidos revelaram-se essenciais para a análise espacial do evento, tendo sido posteriormente integrados em ambiente de Sistemas de Informação Geográfica. A partir desta informação, foi possível proceder à elaboração da cartografia da área inundável, permitindo delimitar a extensão da inundação e analisar a distribui o da profundidade da água ao longo do território. Definido o plano de cheia, o mesmo foi cruzado com o MDT LiDAR de 50 cm e obtiveram-se as alturas de cheia para o momento de maior caudal, a 5 de fevereiro.

5. CONCLUSÕES

A análise preliminar e síntese apresentada evidenciam a importância de relacionar temporal e espacialmente os vários fatores que conduzem   gera o de pontas de cheia. Havendo uma outra forma de gestão atempada e preventiva dos níveis de água nas albufeiras, provavelmente teria sido possível evitar as magnitudes de cheia que se observaram. Este trabalho   uma modesta forma de sensibiliza o para a necessidade de considerar as várias escalas de atua o presentes num processo de cheia: a escala da bacia hidrográfica, com as suas características de rece o e reten o da precipita o, a sua permeabilidade, relevo e estruturas humanas; e a escala do vale, a jusante, onde o caudal gerado ao nível da bacia hidrográfica se distribui, de acordo com a morfologia do leito de inunda o, em contextos geográficos cada vez mais artificializados.

Capítulo VI - Geomorfologia glaciária e periglaciária

Geomorfología del alto Pigüeña (Somiedo, Asturias)

Geomorphology of the Upper Pigüeña Valley (Somiedo, Asturias)

A. Romero¹*, D. Cañedo¹

¹ Universidad de Oviedo, Departamento de Geografía, C/ Francisco de Miranda, s/n, 33003, Oviedo/Uviéu, Asturias, España
uo294312@uniovi.es

RESUMEN

El relieve del alto Pigüeña es de origen poligenético, con un modelado glaciar pleistoceno muy bien conservado (siete circos y valles en artesa). Se identifican tres fases glaciares con cotas mínimas de 800 m. Actualmente, la dinámica periglacial es dominante por encima de los 1800 m, destacando el glaciar rocoso de El Cornín y procesos de gelifracción y solifluxión. El modelado kárstico es marginal, mientras que la red fluvial aprovecha la sobreexcavación glaciar previa.

Palabras clave: *Alto Pigüeña, Somiedo, Cordillera Cantábrica, Geomorfología, Glaciarismo, Periglacialismo.*

Keywords: *Upper Pigüeña, Somiedo, Cantabrian Mountains, Geomorphology, Glacial Geomorphology, Periglacial Processes.*

1. INTRODUCCIÓN

El alto valle del río Pigüeña (Figura 1) constituye un escenario representativo del relieve de alta montaña cantábrica, donde convergen herencias glaciares pleistocenas y procesos periglaciares y fluviotorrenciales activos. El trabajo de Nussbaum & Gyax (1952) fue el primero en cartografiar la extensión de las lenguas glaciares durante el Último Máximo Glaciar en el alto Pigüeña y en situar la cota de nieves perpetuas en 1500 m s.n.m. Más adelante, el foco se desplazó hacia el periglacialismo y el detalle de las huellas del hielo, destacando el trabajo de Menéndez Duarte & Marquínez (1996), quienes documentaron formas de modelado en enclaves cuarcíticos y en depósitos de *till* con clastos estriados. Los últimos estudios han incorporado métodos avanzados para estudiar la dinámica actual, como el transporte fluvial y la gelifluxión, integrando al alto Pigüeña en las síntesis científicas sobre el glaciarismo de la Cordillera Cantábrica (Redondo Vega *et al.*, 2010; Gómez Villar *et al.*, 2011; Castañón & Frochoso, 1994; Frochoso & Castañón, 1997; Rodríguez Pérez, 2015; Rodríguez Rodríguez *et al.*, 2016; Menéndez Duarte *et al.*, 2017; Ruiz Fernández *et al.*, 2022)

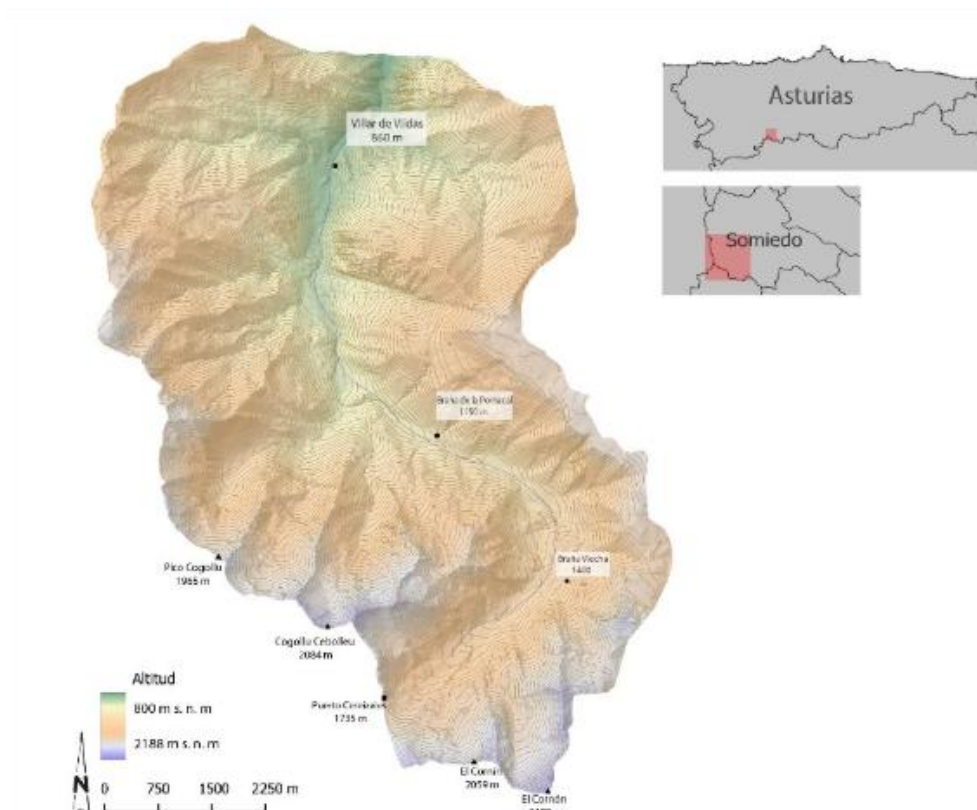


Figura 1. Mapa de localización del alto Pigüeña.

2. MÉTODO

La investigación comenzó con una fase de gabinete centrada en la revisión bibliográfica y el análisis cartográfico. Se integraron datos del IGN, IGME y AEMET para definir el marco geológico y climático, complementados con una fotointerpretación exhaustiva mediante ortofotografías del PNOA y modelos 3D de Google Earth para identificar preliminarmente las macroformas del relieve.

El trabajo de campo consistió en tres campañas de prospección directa realizadas entre junio y octubre de 2025. Durante estas jornadas se validaron las unidades morfoestructurales, se cartografiaron depósitos y formas erosivas, y se empleó georreferenciación UTM junto a un registro fotográfico multiescalar para analizar procesos activos como la crioclastia y el modelado kárstico.

Para la reconstrucción paleoglaciaria, se estimó la paleo-ELA mediante el método THAR (Toe-to-Headwall Altitude Ratio). Este análisis morfométrico se basó en la relación altimétrica entre los frentes morrénicos y las cabeceras de los circos, aplicando un coeficiente de 0,4, parámetro estándar en la Cordillera Cantábrica.

3. RESULTADOS

Los resultados muestran una importante dinámica glaciaria relict, procesos periglaciares activos, así como otras formas de modelado de carácter mixto y alternativo (Figura 2 y Figura 3).

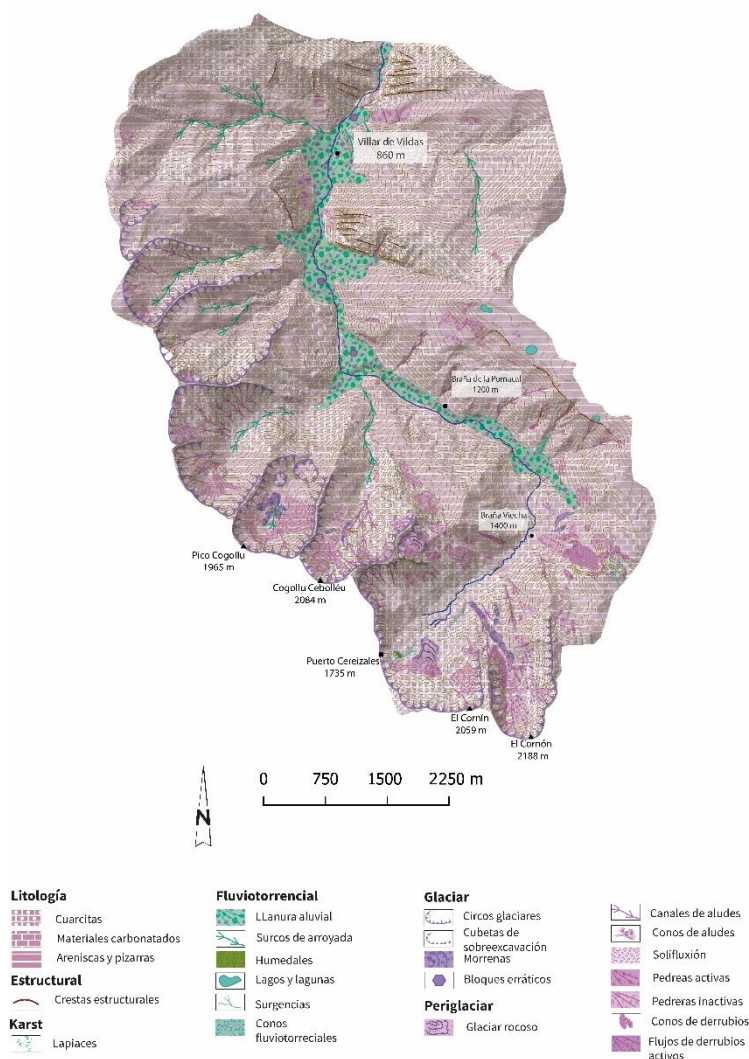


Figura 2. Mapa geomorfológico del alto Pigüña.



Figura 3. Formas de modelado representativas del área de estudio. Izquierda, valle glaciar del alto Pigüña visto desde La Pornacal. Arriba, glaciar rocoso de El Cornín. Abajo, circo glaciar de El Cornón.

3.1. Formas kársticas

El relieve está condicionado por una litología predominantemente silíceo (cuarcitas y areniscas), con la excepción de Pena Canseco (1951 m), único afloramiento calcáreo del área. Esta unidad presenta una estructura sinclinal con flancos convergentes. La karstificación es marginal y de carácter incipiente (karst nival), manifestándose en *rillenkarren* y dolinas embrionarias, limitadas por la escasa potencia de las calizas y la interferencia de procesos gravitacionales.

3.2. Formas fluvio-torrenciales

La red fluvial drena hacia el eje principal del Pigüña, que presenta una morfología de artesa. Destacan:

- Hitos hidromorfológicos: saltos de agua (El Corralón) originados por resaltes estructurales.
- Sistemas lénticos: cubetas de sobreexcavación que albergan turberas, como la del Puerto Cereizales (5249 m²), cerrada por una morrena y lagos glaciares como el lago Bueno (8918 m²).
- Surcos de arroyada: formación de surcos de arroyada acentuados por la pérdida de cubierta vegetal tras incendios, y pequeños conos de deyección en las rupturas de pendiente del valle principal.

3.3. Formas glaciares

El área de estudio conserva una notable herencia del Último Ciclo Glaciar. Se han identificado siete circos glaciares de morfología abierta, orientados mayoritariamente al N-NE. El circo de El Cornón (~2 km de longitud) es el aparato de mayor envergadura.

A partir de la posición de los complejos morrénicos y bloques erráticos (localizados hasta los 800 m en Villar de Vildas), se propone una evolución en tres fases:

1. Fase de Máxima Expansión (MEH): se define un sistema glaciar con su frente a 800 m s.n.m. y una extensión de 2034,4 ha. La altitud media de la paleo-ELA se sitúa en 1257 m s.n.m.
2. Fase Interna (Estadios de retroceso): Fase Interna I: se propone un glaciar cuyo frente asciende hasta los 1000 m s.n.m., con una extensión de 1676 ha y una paleo-ELA media a 1412 m s.n.m. En la Fase Interna II: el frente se estabilizó a 1400 m s.n.m., reduciendo su extensión a 841 ha. La media de la paleo-ELA se elevaba hasta los 1643 m s.n.m.
3. Fase de Altitud y glaciares rocosos: Restricción del hielo a los circos de cabecera y transición a glaciares rocosos. En este estadio, se identifican cinco glaciares independientes que ocupan una superficie total de 170 ha. La altitud media de los frentes se situó en los 1700 m s.n.m., mientras que la paleo-ELA media alcanzaba los 1848 m s.n.m.

3.4. Formas periglaciares

Los procesos nivoperiglaciares definen el modelado actual en las cotas más elevadas. Destacan:

- Glaciares rocosos: el ejemplar de El Cornón (1600-1730 m s.n.m.) es la forma más significativa, compuesto por bloques de ortocuarcita y delimitado por un arco morrénico frontolateral.
- Procesos de vertiente: canales y conos de aludes que conectan las crestas con el fondo del valle, junto con fenómenos de solifluxión y gelifluxión (lóbulos y bloques aradores) activos por encima de los 1800 m s.n.m.
- Meteorización mecánica: intensa crioclastia en las cumbres (ejemplos: El Cornón y el Cogollu Cebolléu) y formación de pedreras. Se observa un claro control altitudinal: por debajo de los 1700 m s.n.m., las pedreras se encuentran fitoestabilizadas (inactivas), mientras que en las cotas superiores mantienen una dinámica activa.

4. DISCUSIÓN

La evolución geomorfológica del alto Pigüña sigue el patrón poligenético descrito en otros macizos de la Cordillera Cantábrica (ejemplos: Picos de Europa, Fuentes Carrionas, macizo de Peña Ubiña).

- Litología vs. formas: a diferencia de los sectores calcáreos de Picos de Europa o Peña Ubiña, el predominio silíceo en el Pigüña favorece la conservación de macroformas erosivas (valles en U, circos y horns), pero limita el desarrollo de microformas kársticas.
- Sincronismo glaciar: las tres pulsaciones glaciares identificadas en el alto Pigüña muestran paralelismos con las secuencias tardiglaciares regionales, aunque presentan diferencias en el número de subestadios respecto a sectores como El Puerto Ventana, lo que sugiere una respuesta local diferenciada condicionada por la topografía y la orientación.
- Umbrales de actividad: la cota de 1800 m s.n.m. se establece como el límite inferior del piso periglacial activo actual, coincidiendo con las observaciones en otros macizos silíceos del noroeste peninsular.

5. CONCLUSIONES

1. El alto Pigüña presenta un relieve de herencia glaciar bien conservado, con siete aparatos principales que alcanzaron cotas mínimas de 800 m s.n.m. durante el Pleistoceno.
2. La transición de un modelado glaciar dominado por la erosión a una dinámica postglaciar ha permitido la génesis de humedales y turberas de alto valor ecológico en cubetas de sobreexcavación.
3. El periglacialismo actual es el principal agente morfogenético en las cumbres, con el glaciar rocoso de El Cornín como exponente de la degradación del permafrost de montaña.
4. Este estudio aporta el primer inventario geomorfológico detallado de este sector, fundamental para la gestión del patrimonio geomorfológico en el Parque Natural de Somiedo.

Referencias

- Castañón, J. C., & Frochoso, M. (1994). El periglacialismo de la Cordillera Cantábrica. En A. Gómez Ortiz, M. Simón Torres, & F. Salvador Franch (Eds.), *Periglacialismo en la Península Ibérica, Canarias y Baleares* (pp. 75–91). Sociedad Española de Geomorfología.
- Frochoso, M., & Castañón, J. C. (1997). El relieve glaciar de la Cordillera Cantábrica. En A. Gómez Ortiz & A. Pérez Alberti (Eds.), *Las huellas glaciares de las montañas españolas* (pp. 65–137).
- Gómez Villar, A., González Gutiérrez, R. B., Redondo Vega, J. M., & Santos González, J. (2011). Distribución de glaciares rocosos relictos en la Cordillera Cantábrica. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 37(2), 49–80. <https://doi.org/10.18172/cig.1256>
- Menéndez Duarte, R. A., & Marquínez, J. (1996). Glaciarismo y evolución tardiglaciar de las vertientes del valle de Somiedo. *Cordillera Cantábrica. Cuaternario y Geomorfología*, 10(3-4), 21-31.
- Menéndez Duarte, R. A., Vázquez Tarrio, D., & Fernández, S. (2017). Gelifluction and another soil creep landforms in the Cantabrian Range (Somiedo Zone). En J. Ruiz Fernández, C. García Hernández, M. Oliva, C. Rodríguez Pérez, & D. Gallinar (Eds.), *Ambientes periglaciares: avances en su estudio, valoración patrimonial y riesgos asociados* (p. 90). Servicio de Publicaciones, Universidad de Oviedo.
- Nussbaum, F., & Gygas, F. (1952). La glaciation quaternaire dans la Cordillère Cantabrique (Espagne du Nord). *Revue géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest*, 23(1), 36-48.

- Redondo Vega, J. M., Gómez Villar, A., González Gutiérrez, R. B., & Santos González, J. (2010). Los glaciares rocosos de la Cordillera Cantábrica. Secretariado de Publicaciones, Universidad de León. <https://hdl.handle.net/10612/24886>
- Rodríguez Pérez, C. (2015). El relieve de la Montaña Central Asturiana: La Sierra de Sobia y el Macizo de Somiedo. Real Instituto de Estudios Asturianos.
- Rodríguez Rodríguez, L., Jiménez Sánchez, M., Domínguez Cuesta, M. J., Rinterknecht, V., Pallàs, R., & Bourlès, D. (2016). Chronology of glaciations in the Cantabrian Mountains (NW Iberia) during the Last Glacial Cycle based on in situ-produced. *Quaternary Science Reviews*, 138, 31–48. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2016.02.027>
- Ruiz Fernández, J., González Díaz, B., Gallinar Cañedo, D., & García Hernández, C. (2022b). The glaciers of the Central-Western Asturian Mountains. En M. Oliva, D. Palacios, & J. M. Fernández Fernández (Eds.), *Iberia, Land of Glaciers: How the mountains were shaped by glaciers* (pp. 265–288). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821941-6.00013-X>

Cartografia geomorfológica e dinâmica glaciária no setor de Compadre (Serra do Gerês, NW Portugal)

Geomorphological mapping and glacial dynamics in the Compadre sector (Serra do Gerês, NW Portugal)

E. Figueira¹*, A. Gomes¹, P. Pereira², J. Santos-González³

¹ Faculdade de Letras da Universidade do Porto, Departamento de Geografia, Centro de Estudos de Geografia e Ordenamento do Território, Porto, Portugal

² Universidade do Minho, Departamento de Ciências da Terra, Braga, Portugal

³ Universidad de León, Departamento de Geografía y Geología, León, España

* edgarjunceiro@gmail.com

ABSTRACT

The Gerês Mountain host a significant record of Upper Pleistocene glaciations; however, detailed geomorphological mapping of glacial landforms remains limited. This study presents high-resolution geomorphological mapping of the terminal sector of the Compadre sector (Biduiça-Dola valleys), integrating LiDAR-derived DEMs (10 pts/m²) and field validation. Results show a complex assemblage of landforms, notably lateral and recessional moraine systems. These findings provide new data for palaeoglacial reconstructions and to understand the glacier retreat dynamics in the mountain of Gerês.

Palavras-chave: *Cartografia Geomorfológica; Paleoglaciares; Moreias, Serra do Gerês; LiDAR*

Keywords: *Geomorphological mapping; Palaeoglaciers; Moreias, Serra do Gerês; LiDAR*

1. INTRODUÇÃO

Em áreas montanhosas, a cartografia geomorfológica constitui um instrumento fundamental para a interpretação do modelado glaciário, permitindo compreender a organização espacial do fluxo de gelo e suportando a reconstrução das dinâmicas paleoglaciárias (Pérez-Alberti & Gómez-Pazo, 2023). Neste contexto, as montanhas de baixa altitude do noroeste da Península Ibérica assumem particular relevância.

A Serra do Gerês, integrada no Parque Nacional da Peneda-Gerês (PNPG), destaca-se entre as montanhas do noroeste da Península Ibérica que preservam um registo significativo das glaciações do Pleistocénico Superior (Ferreira, 1999). Desse modo, constitui um laboratório natural de particular relevância para o estudo das dinâmicas paleoglaciárias. Estudos anteriores identificaram circos glaciários, moreias e vales glaciários, propondo interpretações sobre a extensão dos glaciares e os padrões de fluxo do gelo (Coudé-Gaussen, 1981; Vidal-Romaní et al., 1990; Ferreira, 1999; Ferreira et al., 2000; Pérez-Alberti, 2021).

Apesar destes contributos, a delimitação espacial das geoformas glaciárias permanece imprecisa, e a representação dos processos morfogenéticos continua, em muitos casos, esquemática. A recente disponibilização de dados LiDAR pela Direção-Geral do Território (DGT) constitui um avanço metodológico significativo, permitindo refinar e complementar os registos e interpretações prévias. Assim, o presente estudo apresenta uma cartografia geomorfológica detalhada do setor de Compadre

(Ribeiros da Biduiça–Dola). O objetivo é complementar as interpretações de Ferreira (1999), através da integração de modelos digitais de elevação (MDE) de alta resolução, contribuindo para uma delimitação mais precisa e interpretação mais robusta das formas glaciárias, fluvioglaciárias, paraglaciárias e fluviais desse setor.

2. ÁREA DE ESTUDO

A Serra do Gerês, cujo ponto mais elevado corresponde ao pico da Nevosa (1546 m a.s.l.), é litologicamente dominada por granitos variscos. O setor terminal do paleoglacial dos rios Biduiça–Dola situa-se na vertente oriental da serra, entre aprox. 900 e 1350 m, numa área homogénea dominada por granitos porfiróides biotíticos (Granito do Gerês), localmente marcada pela presença de filões de quartzo (Serviços Geológicos de Portugal, 1984).

A estrutura do maciço é condicionada por um sistema de fraturação denso associado à tectónica tardi-hercínica (Pérez-Alberti, 2021). O padrão de diaclasamento ortogonal do substrato (W-E, NW-SE, SW-NE) controla a organização da rede de drenagem, conferindo-lhe um traçado retilíneo e frequentemente perpendicular (Pérez-Alberti, 2021). Do ponto de vista climático, a área apresenta forte influência atlântica, com valores elevados de precipitação média anual, frequentemente superiores a 2500–3000 mm. As temperaturas médias anuais variam aproximadamente entre 8 °C e 12 °C, podendo as temperaturas médias de inverno descer abaixo de 5 °C nas áreas mais elevadas (AEMET & IM, 2011).

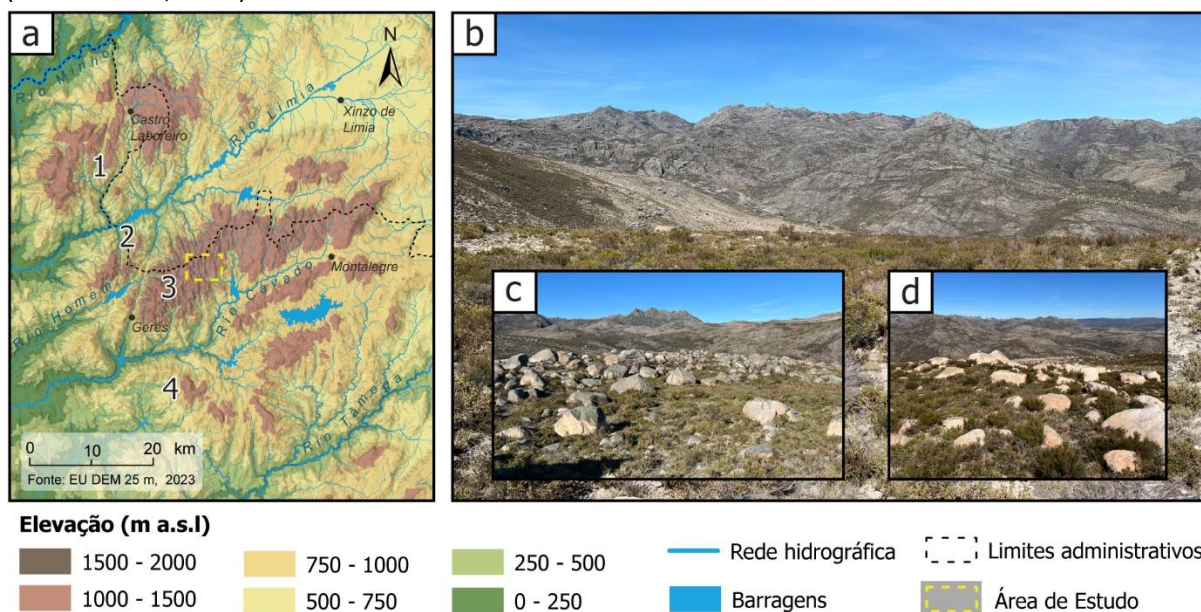


Figura 1. Localização das serras glaciadas do NW de Portugal: a) Peneda (1), Amarela (2), Gerês (3), Cabreira (4); b) Vista panorâmica do Gerês e da moreira lateral de Compadre; c) Morfologia da moreia lateral do Ribeiro da Biduiça; d) Acumulação de blocos erráticos na vertente do Ribeiro da Biduiça.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A interpretação geomorfológica baseou-se na integração de dados topográficos, cartográficos e bibliográficos. A identificação das formas do relevo foi realizada a partir de dados LiDAR (10 pts/m²), disponibilizados pela Direção-Geral do Território (DGT), a partir dos quais foram derivados modelos de sombreamento multidirecional, declive e abertura diferencial (resolução de 0,5 m), bem como curvas de nível. A análise foi complementada com cartografia geológica (Serviços Geológicos de Portugal, 1984), ortofotomapas (SNIG), cartas militares (1:25 000) e a revisão de trabalhos anteriores (Vidal-Romaní et al., 1990; Ferreira, 1999).

A classificação geomorfológica seguiu a legenda CNRS RCP-77 (Taillefer, 1972), adaptada pela Universidade de Lausanne (Lambiel et al., 2013). As interpretações foram validadas por trabalho de campo e levantamento georreferenciado ($n = 38$). A cartografia final foi elaborada em ambiente QGIS.

4. RESULTADOS

O mapeamento geomorfológico do setor terminal da língua glaciária evidencia um conjunto diversificado de formas e depósitos de génese glaciária, fluvioglaciária e paraglaciária. As formas deposicionais são dominadas por sistemas morénicos, incluindo moreias laterais e de recuo. As moreias laterais apresentam concentrações de blocos erráticos de grande dimensão (>7 m), enquanto as moreias de recuo exibem uma morfologia mais desmantelada, caracterizada por alinhamentos pouco definidos de blocos erráticos de menor dimensão (3–7 m) e por maior presença de material fino. As formas de erosão glaciária encontram-se bem representadas, destacando-se afloramentos graníticos aborregados e superfícies rochosas polidas, bem como a transição suavizada entre as vertentes e o fundo de vale, típica de ambientes sujeitos a abrasão glaciária. Os depósitos fluvioglaciários ocorrem sob a forma de leques no término das vertentes e depósitos em setores aplanados do vale do ribeiro da Biduiça, atualmente afetados pela incisão da rede hidrográfica.

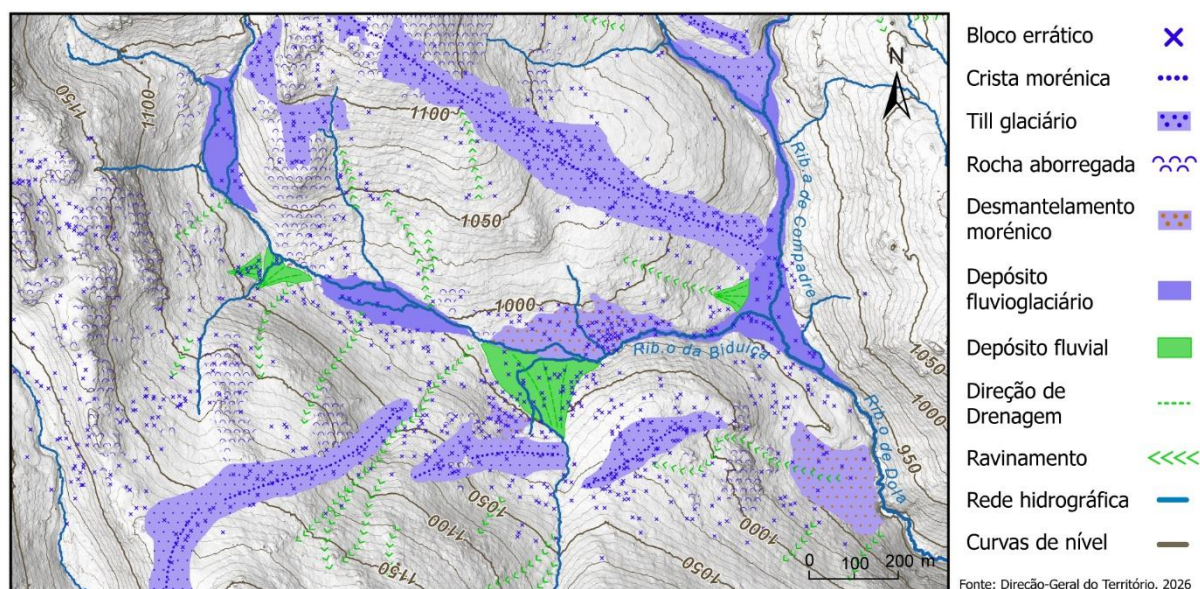


Figura 2. Mapa geomorfológico do setor terminal de Compadre.

5. DISCUSSÃO

A diferenciação observada entre moreias laterais e de recuo pode ser interpretada no contexto de processos paraglaciários associados à perda de suporte glaciário (*debuttressing*). A retirada do gelo terá promovido instabilidade nas vertentes adjacentes e nos depósitos morénicos, favorecendo a remobilização dos materiais. Neste enquadramento, a preservação relativa das moreias laterais, caracterizadas por blocos de grande dimensão pouco mobilizados, contrasta com o carácter mais desmantelado das moreias de recuo, onde a mobilização de material fino e a reorganização dos blocos sugerem uma maior exposição a processos de vertente e incisão fluvial.

Estas dinâmicas encontram-se pouco exploradas nas representações geomorfológicas anteriores, cuja natureza mais generalizada reflete, em parte, as limitações dos dados disponíveis à época. A utilização de dados LiDAR de elevada resolução permite uma delimitação mais precisa das formas e evidencia a heterogeneidade dos processos de remobilização de materiais nas vertentes, contribuindo para uma leitura mais detalhada da evolução paraglaciária da paisagem. Este padrão é consistente com um

sistema geomorfológico condicionado pela remoção do suporte glaciário e pela reorganização das vertentes e da rede hidrográfica (Santos et al., 2017).

6. CONCLUSÃO

A análise geomorfológica detalhada permitiu identificar formas de menor expressão topográfica, anteriormente pouco representadas na cartografia existente, evidenciando o contributo dos dados LiDAR para o refinamento da leitura morfológica. A organização espacial dos sistemas morénicos sugere uma deglaciação faseada da língua glaciária, marcada por posições sucessivas de estabilização que ficaram registadas na paisagem.

Os depósitos morénicos evidenciam graus diferenciados de remobilização por processos de vertente e incisão fluvial, refletindo uma evolução paraglaciária significativa após a retirada do gelo (Santos et al., 2017). A coexistência de formas de erosão bem preservadas com depósitos parcialmente retrabalhados revela a complexidade dos processos de transição entre o ambiente glaciário e os domínios fluvial e de vertente. Neste contexto, a organização espacial das formas mapeadas constitui uma base robusta para a identificação de fases de deglaciação e para a reinterpretação da dinâmica paleoglaciária no setor de Compadre.

Referências

- Agencia Estatal de Meteorología Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, A., & Instituto de Meteorologia de Portugal, I. (2011). Atlas Climático Ibérico: Temperatura do Ar e Precipitação (1971-2000)/Iberian Climate Atlas: Air Temperature and Precipitation (1971/2000).
http://www.ipma.pt/resources.www/docs/publicacoes.site/atlas_clima_iberico.pdf%0A
- Coudé-Gaussen, G. (1981). Les Serras da Peneda et do Gerês - Étude Geomorphologique (5; p. 284).
- Ferreira, A. B.; Vidal-Romaní, J. R.; Vilaplana, J. M.; Rodrigues, M. L.; Zêzere, J. L.; Monge, C. (1992) – Formas e depósitos glaciários e periglaciários da Serra do Gerês-Xurés (Portugal; Galiza). Levantamento cartográfico. Cuad. Lab. Xeol. Laxe, 17: 121-135.
- Ferreira, A. B., Vidal-Romaní, J. R. V., Zêzere, J. L., & Rodrigues, M. L. (2000). A glaciação Plistocénica da Serra do Gerês. Finisterra, XXXV, 69, 39–68.
- Ferreira, A. B., Vidal-Romaní, J. R.; Zêzere, J. L.; Rodrigues, M.L. (1999). A glaciação Plistocénica da Serra do Gerês - Vestígios geomorfológicos e sedimentológicos. A.G.F.A., Rel. 37, Centro de Estudos Geográficos, Lisboa, 150 p.
- Geneviève Coudé-Gaussen. (1981). Les Serras da Peneda et do Gerês. In Les Serras da Peneda et do Gerês: Vol. No. 5. Memórias do Centro de Estudos Geográficos.
- Lambiel, C., Maillard, B., Regamey, B., Martin, S., Kummert, M., Schoeneich, P., Ondicol, R. P., & Reynard, E. (2013). Adaptation of the geomorphological mapping system of the University of Lausanne for ArcGIS. Geomorphology, 1. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.03.0>
- Serviços Geológicos de Portugal & Parque Nacional da Peneda-Gerês. (1984). Carta Geológica do Parque Nacional da Peneda-Gerês (Escala 1:50 000) [Mapa]. LNEG.
- Pérez-Alberti, A. (2021). The glaciers of the Peneda, Amarela, and Gerês-Xurés massifs. In Iberia, Land of Glaciers: How The Mountains Were Shaped By Glaciers (Vol. 1, Issue Glacial Geomorphology, pp. 397–416). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821941-6.00019-0>

- Pérez-Alberti, A., & Gómez-Pazo, A. (2023). Geomorphology of the Courel Mountains Unesco Global Geopark (Galicia, NW Iberian Peninsula). *Journal of Maps*, 19(1). <https://doi.org/10.1080/17445647.2023.2257714>
- Santos, J. A. B., Santos-González, J., Redondo-Vega, J. M., & Irwin, J. R. (2017). Glacial deposits in the Serra do Gerês Mountains (NW Iberian Peninsula): till macrofabric analysis. *Physical Geography*, 38(3), 263–285. <https://doi.org/10.1080/02723646.2016.1276879>
- Taillefer, F. (1972). Autres cartes géomorphologiques : Cartographie géomorphologique . Travaux de la RCP 77 . Service de documentation et de cartographie géographiques. 487–488.
- Vidal Romani, J.R., Vilaplana, J.M., Ferreira, A, Zezere, J.L., Rodrigues, L., Monge, C. (1990). Los tills de la Serra de Gerês-Xurés y la glaciación pleistocena (Minho, Portugal-Ourense, Galicia). *Cuaternario y Geomorfología*, 4, 13–25.

Distribuição geográfica dos glaciares rochosos nos Pirenéus espanhóis e andorranos: metodologia, problemas e primeiros resultados

Geographical distribution of rock glaciers in the Spanish and Andorran Pyrenees: methodology, problems and preliminary results

C. Severino^{1*}, M. Fernandes^{2,3}, G. Vieira^{1,2}

¹ Instituto de Geografia e Ordenamento do Território, Universidade de Lisboa

² Centro de Estudos Geográficos, Laboratório Associado TERRA, IGOT, Universidade de Lisboa

³ Centro de Ciências do Mar e do Ambiente (MARE), Universidade de Évora

* carolinaseverino@edu.ulisboa.pt

RESUMO

Dada a sua elevada importância ao nível geomorfológico, paleoambiental, climático e hidrológico, os glaciares rochosos têm sido inventariados em ambientes de montanha e nas regiões polares. Neste seguimento, o grupo *Rock Glacier Inventories and Kinematics* (RGIK) estabeleceu normas que visam homogeneizar os critérios utilizados na inventariação destas formas de relevo. Nos Pirenéus, apenas o setor francês possui uma base de dados homogénea, pelo que se procedeu à compilação, uniformização e complementação dos inventários existentes nos setores de Espanha e Andorra, seguindo as normas do RGIK. Posteriormente, discutiram-se os principais problemas decorrentes da inventariação que podem afetar a qualidade da base de dados.

Palavras-chave: *Glaciares rochosos; Pirenéus; RGIK.*

Keywords: *Rock glaciers; Pyrenees; RGIK.*

1. INTRODUÇÃO

Os glaciares rochosos são formas de relevo geradas pela deformação do permafrost, identificáveis pelas seguintes morfologias: frente, margens laterais e, opcionalmente, cristas e sulcos bem definidos (RGIK, 2023). Os glaciares rochosos apresentam grande relevância do ponto de vista geomorfológico, paleoambiental, climático e hidrológico, permitindo aferir a extensão atual e passada de permafrost e avaliar o impacto das alterações climáticas em ambientes de montanha (RGIK, 2023).

Ao longo das últimas décadas, têm-se vindo a inventariar glaciares rochosos em ambientes de montanha e nas regiões polares. Contudo, nota-se uma crescente necessidade de uniformizar estes inventários, uma vez que os critérios utilizados não são homogéneos (Brardinoni *et al.*, 2026; RGIK, 2023). Neste âmbito, o *Action Group on Rock Glacier Inventories and Kinematics* (RGIK) da *International Permafrost Association* (IPA) estabeleceu um conjunto de normas para a identificação e delimitação de glaciares rochosos, com vista a minimizar as incoerências entre bases de dados e a facilitar o acesso às mesmas (RGIK, 2023).

No setor espanhol dos Pirenéus, os glaciares rochosos começaram por ser inventariados nos setores superiores dos altos vales por Chueca (1991), Serrano & Agudo (2004) e Ventura (2016). Só mais recentemente, foi elaborado um inventário que abrange o setor central da cordilheira, considerando as normas do RGIK (Guerrero *et al.*, 2025). No entanto, existem áreas onde a inventariação destas formas de relevo ainda não foi efetuada, dificultando o estabelecimento de relações entre a sua distribuição espacial e características. Por conseguinte, o presente estudo pretende responder a esta problemática, focando-se nos Pirenéus espanhóis e andorranos, dado que o setor francês já dispõe de um inventário homogéneo (Bodin, 2024). Para tal, propuseram-se os seguintes objetivos:

- 1) inventariar os glaciares rochosos com base nas normas estabelecidas pelo RGIK, compilando e integrando os inventários anteriormente realizados;
- 2) identificar os principais problemas na inventariação destas formas de relevo, analisando casos em que não foi possível determinar com certeza se a forma de relevo inventariada corresponde efetivamente a um glaciar rochoso.

2. MÉTODOS E TÉCNICAS

De modo a facilitar o processo de inventariação, a área de estudo foi dividida em 16 bacias hidrográficas (Figura 1), referentes aos rios Irati, Esca, Aragón, Gállego, Ara, Cinca, Garona, Ésera, Isábena, Noguera Ribagorçana, Noguera Pallaresa, Ariège, Segre, Cardener, Llobregat e Ter.

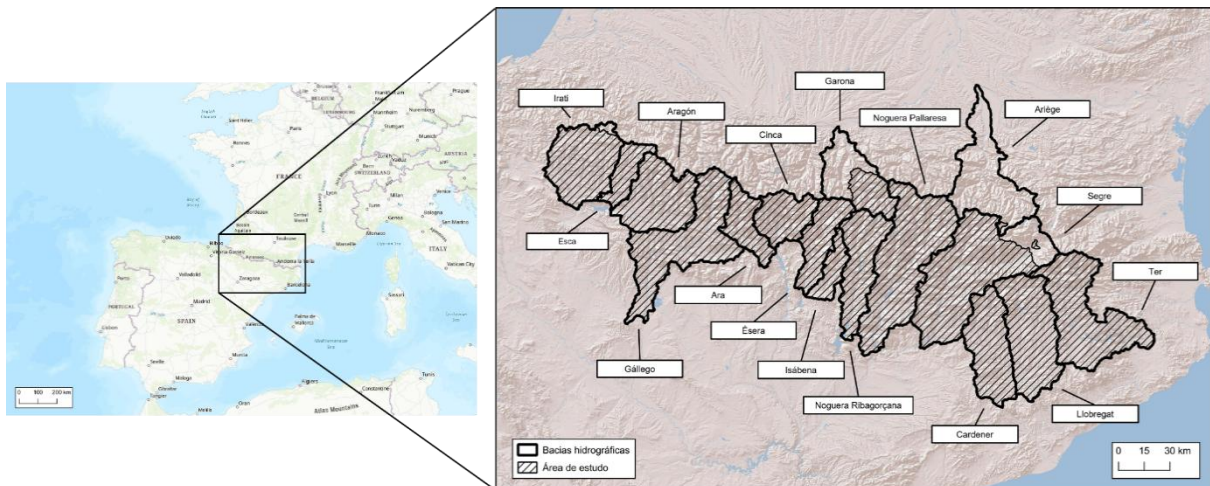


Figura 1. Localização da área de estudo, dividida segundo as bacias hidrográficas consideradas.

A metodologia utilizada para inventariar os glaciares rochosos assenta nos critérios estabelecidos pelo RGIK, seguindo a abordagem geomorfológica, que consiste na deteção, localização, caracterização e delimitação destas formas de relevo (RGIK, 2023), conforme demonstrado abaixo (Figura 2).

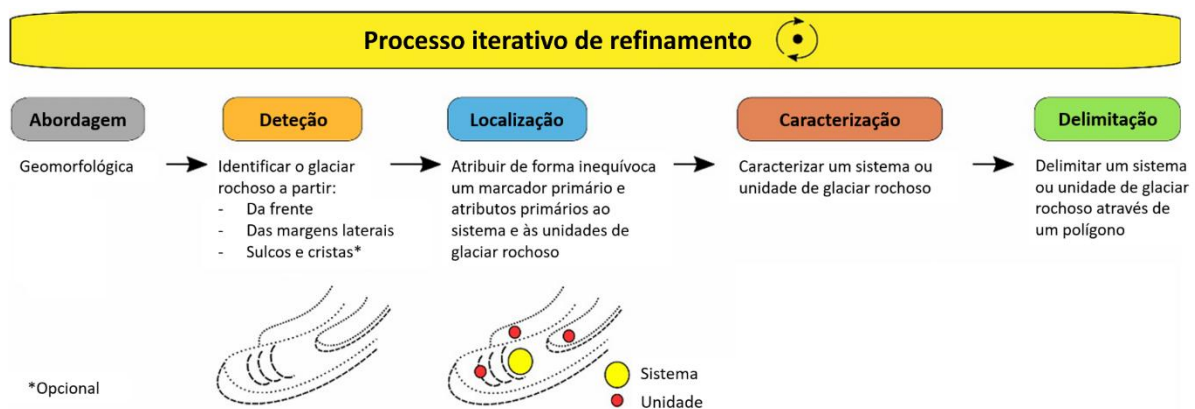


Figura 2. Fluxo de trabalho referente à estratégia recomendada pelo RGIK para a compilação de inventários de glaciares rochosos, adaptado de RGIK (2023).

A deteção é efetuada através de fotointerpretação e da observação de Modelos Digitais do Terreno (MDT), em que se procura identificar a frente, as margens laterais, os sulcos e as cristas dos glaciares rochosos (RGIK, 2023). De seguida, procede-se à localização, em que se marca o glaciar rochoso com um ponto e se atribui um identificador único (RGIK, 2023). Neste seguimento, optou-se por realizar a delimitação antes da caracterização, contrariamente ao sugerido pelo RGIK (2023). Assim, definem-se primeiro os limites e, apenas posteriormente, se caracteriza cada glaciar rochoso quanto à certeza, localização, topografia, morfologia, composição, morfometria, litologia, tipo de conexão a montante, estado de atividade e idade. Esta caracterização é elaborada em ambiente de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), recorrendo-se também à revisão de bibliografia e de cartas geológicas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO PRELIMINARES

No total, inventariaram-se 1310 glaciares rochosos na área de estudo, dos quais 1000 resultaram da compilação e harmonização de inventários realizados anteriormente (cerca de 76%) e 310 foram detetados neste estudo (aproximadamente 24%).

Nas bacias hidrográficas dos rios Irati, Esca, Isábena, Cardener e Llobregat não foram detetados glaciares rochosos, o que reflete as menores altitudes máximas destas bacias relativamente às restantes. Estas evidenciam uma proporção de área inferior a 15% acima de ~1500 metros, altitude a partir da qual foram registados glaciares rochosos na área de estudo.

Por outro lado, verificou-se a presença destas formas de relevo nas restantes bacias hidrográficas, com: 368 no Noguera Pallaresa; 280 no Segre; 262 no Noguera Ribagorçana; 131 no Garona; 106 no Ésera; 40 no Gállego; 39 no Cinca; 27 no Ter; 24 no Aragón; 18 no Ara; e 15 no Ariège.

Contudo, a base de dados apresenta um grau de incerteza de cerca de 10%, uma vez que 131 glaciares rochosos foram classificados como incertos. Isto pode derivar de duas situações: 1) não ser possível identificar, de forma inequívoca, a frente e as margens laterais a partir das ortofotografias aéreas e do MDT; e 2) a forma de relevo em questão ser objeto de dúvida na literatura.

Na realidade, os glaciares rochosos incertos podem corresponder a outras formas de relevo como moreias e *debris-covered glaciers* (RGIK, 2023), uma vez que estes podem apresentar morfologias semelhantes. Para além disso, existem casos em que estas formas de relevo se encontram espacialmente conectadas. Quando isto se verifica, o processo de delimitação torna-se mais complexo, dada a maior dificuldade em definir o limite entre o glaciar rochoso e a moreia ou o *debris-covered glacier*, correndo-se o risco de se subestimar ou sobrestimar a área do glaciar rochoso.

4. CONCLUSÕES

Através deste estudo foi possível identificar, delimitar e caracterizar 1310 glaciares rochosos nos Pirenéus espanhóis e andorranos. No entanto, constatou-se a ausência deste tipo de formas de relevo nas bacias hidrográficas dos rios Irati, Esca, Isábena, Cardener e Llobregat.

A principal dificuldade encontrada prende-se com a subjetividade associada à identificação de glaciares rochosos, refletindo-se nalgumas incoerências encontradas na literatura. Assim, com vista a minimizar a incerteza associada aos inventários de glaciares rochosos, seria importante que, para além da adoção dos critérios definidos pelo RGIK, se procedesse também à validação destas formas de relevo através de trabalho de campo, sempre que possível.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Anna Echeverria, Enrique Serrano, José Fernández-Fernández, José García-Ruiz, Josep Ventura e Marc Oliva a disponibilização de inventários e/ou a participação na revisão da base de dados.

Referências

- Bodin, X. (2024). Inventaire des glaciers rocheux des Pyrénées françaises - bilan de la révision. EDYTEM, Université de Savoie Mont-Blanc, UMR 5204 CNRS. <https://hal.science/hal-04736427v1>.
- Brardinoni, F., Vivero, S., Barboux, C., Bodin, X., Cicoira, A., Echelard, T., Hu, Y., Jones, N., Lambiel, C., MacDonell, S., Pellet, C., Rouyet, L., Ruiz, L., Schaffer, N., Wehbe, M., & Delaloye, R. (2026). RGIK guidelines for compiling consistent rock glacier inventories. *Geomorphology*, 492, 110050. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2025.110050>.
- Chueca, J. (1991). Análisis de la distribución espacial de los glaciares rocosos en el Pirineo Central oscense. *Geographica*, 28, 85-100. https://doi.org/10.26754/ojs_geoph/geoph.1991281844.
- Guerrero, J., Guerra, M., Yannick, T., Desir, G., & Colas, B. (2025). Kinematic inventory of rock glaciers in the Pyrenees based on InSAR and airborne LiDAR data. *Remote Sensing of Environment*, 326, 114798. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2025.114798>.
- RGIK (2023). Guidelines for inventorying rock glaciers: baseline and practical concepts (version 1.0). IPA Action Group Rock glacier inventories and kinematics, 25 pp, <https://doi.org/10.51363/unifr.srr.2023.002>.
- Serrano, E., & Agudo, C. (2004). Glaciares rocosos y deglaciación en la alta montaña de los Pirineos aragoneses (España). *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural*, 99(1-4), 159-172.
- Ventura, J. (2016). Identificación e inventario de potenciales glaciares rocosos activos en los pirineos mediante fotointerpretación en visores cartográficos 2d y 3d: primeros resultados. *Polígonos. Revista de Geografía*, 28, 95-122. <https://doi.org/10.18002/pol.v0i28.4289>.

Capítulo VII - Património geomorfológico

Itinerario geomorfológico por el entorno del Siega l'Abá (macizo de Peña Ubiña, Cordillera Cantábrica)

Geomorphological itinerary through the Siega l'Abá area (Peña Ubiña Massif, Cantabrian Mountains)

D. Cañedo¹*, A. Romero¹

¹ Universidad de Oviedo, Departamento de Geografía, C/ Francisco de Miranda, s/n, 33003, Oviedo/Uviéu, Asturias, España.

* gallinardavid@uniovi.es

RESUMEN

Este trabajo presenta un itinerario didáctico circular de 11 km en el macizo de Peña Ubiña (Asturias) para valorizar su patrimonio geomorfológico. Mediante revisión bibliográfica y trabajo de campo, se seleccionaron seis paradas estratégicas entre 1220 y 1957 m s.n.m. El recorrido permite interpretar formas glaciares, kársticas y procesos periglaciares activos. El recurso destaca como herramienta clave para la divulgación científica y la gestión de este espacio protegido.

Palabras clave: *Ubiña, itinerario didáctico, patrimonio geomorfológico, paisaje, espacio natural protegido, alta montaña.*

Keywords: *Ubiña, educational itinerary, geomorphological heritage, landscape, protected natural area, high mountain.*

1. INTRODUCCIÓN

Los itinerarios geográficos se definen como recorridos estructurados a través de enclaves de alto valor patrimonial, donde se concatenan paradas en puntos de especial relevancia técnica y científica. Su narrativa pivota sobre aspectos fundamentales del paisaje y sus componentes, orientándose hacia objetivos didácticos, divulgativos, científicos o de desarrollo turístico (Huo & Serrano, 2022; Ruiz Pedrosa *et al.*, 2024). En las últimas décadas, ha proliferado el número de trabajos que abordan esta metodología aplicada a la geomorfología de la alta montaña cantábrica (García Hernández *et al.*, 2019; Gallinar *et al.*, 2025). Asimismo, la literatura científica ha corroborado que el diseño y la ejecución de itinerarios en espacios naturales protegidos fomentan la concienciación y el cuidado del patrimonio geomorfológico y del paisaje (Feuillet & Sourp, 2011; Martín Duque *et al.*, 2012; González Amuchastegui *et al.*, 2014; Pica *et al.*, 2015; Reynard & Coratza, 2016; Duval & Campo, 2018; Gallinar *et al.*, 2024). Este enfoque resulta una necesidad imperativa en territorios en transformación, sujetos a una creciente presión de visitantes y una demanda turística en auge. El presente trabajo propone un itinerario didáctico en el macizo de Peña Ubiña, uno de los enclaves montañosos más representativos del noroeste de la Península Ibérica.

El macizo de Peña Ubiña representa el tercer núcleo orográfico de la Cordillera Cantábrica por altitud (2417 m s.n.m.), con 58 cumbres que superan los 2000 m s.n.m. Geológicamente, destaca por potentes estratos de caliza carbonífera que conforman cordales subverticales en contraste con valles pizarrosos y de ortocuarcitas. Su proximidad al mar Cantábrico y la influencia de los vientos del oeste generan precipitaciones superiores a 2000 mm anuales (mayoritariamente nivales en cumbres) y un recurrente efecto *foehn* en la vertiente asturiana. La vegetación se organiza en cinturones bioclimáticos que transitan desde los hayedos, robledales y acebedos del piso montano (750-1600 m s.n.m.), pasando

por las praderías del piso subalpino (1600-2000 m s.n.m.), hasta alcanzar el piso alpino (2000-2417 m s.n.m.), caracterizado por especies de bajo porte y alta resistencia térmica como las saxífragas.

2. MÉTODO

El diseño del itinerario se ha estructurado en tres fases secuenciales. En primer lugar, se realizó la revisión de literatura científica, cartografía temática y bases de datos para establecer el marco teórico y la información de base. Posteriormente, se llevó a cabo el trabajo de campo, consistente en campañas de reconocimiento *in situ* para validar la viabilidad de los trayectos y seleccionar los puntos de mayor interés geomorfológico según su representatividad y accesibilidad. Finalmente, se procedió a la síntesis y diseño del recurso, donde se integraron los datos obtenidos, se definieron las paradas estratégicas y se redactaron los contenidos interpretativos finales.

3. RESULTADOS

El itinerario didáctico se desarrolla por el extremo más oriental del macizo de Peña Ubiña. Consiste en un recorrido circular con inicio y fin en la localidad de Tuíza Riba (1220 m s.n.m.) y cuenta con una longitud de 11 km en la que se realizarán seis paradas (Figura 1). La cota mínima se alcanza en el punto de partida y finalización, mientras que la máxima altitud está próxima a la sexta parada, a 1957 m s.n.m., lo que supone un desnivel de 737 m, con una dificultad media en un ámbito de alta montaña.

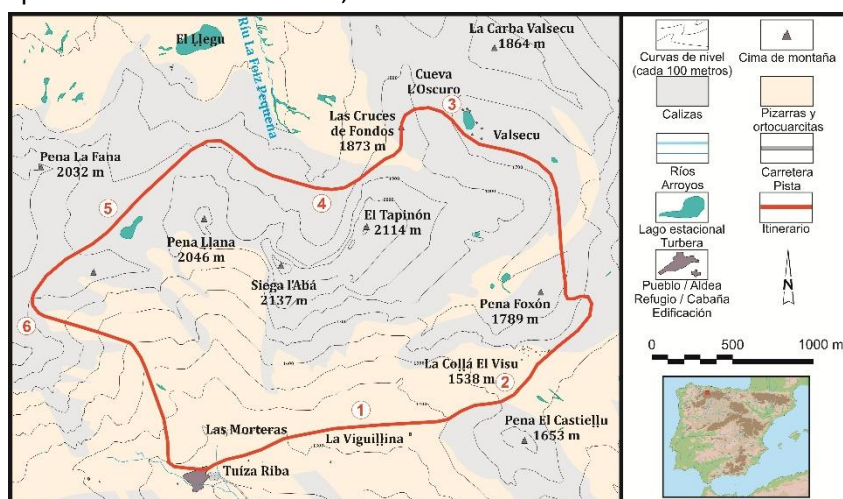


Figura 1. Mapa del itinerario propuesto por el entorno del Siega l'Abá (macizo de Peña Ubiña).

3.1. Parada 1: Las Morteras de Tuíza

Tras abandonar la localidad de Tuíza Riba en dirección este partiendo desde el abrevadero del pueblo hay que caminar 1,3 km y ascender 122 m por un sendero hasta llegar a Las Morteras de Tuíza (1342 m s.n.m.). Este punto cuenta con abundantes formas de modelado de aludes, destacando los canales y los conos que vierten por la ladera meridional del Siega l'Abá y que son plenamente activos en temporada de nieve. Desde aquí se podrá volver la vista hacia atrás (al oeste) para observar el valle glaciar de Tuíza, con numerosas morrenas resultado de la evolución de un glaciar que descendió por este valle hasta los 980 m s.n.m. y del que se puede hacer un barrido completo al observar hasta el circo glaciar de El Planón, desde el cual partía el flujo de hielo.

3.2. Parada 2: La Collá El Visu

Camino hacia La Collá El Visu (1538 m s.n.m.), a 2,4 km del punto de partida, se atraviesa un valle glaciar en el que se conservan morrenas, así como el característico pulido de la roca. En este sector,

además, se conserva una morrena de nevero, así como pederas que muestran síntomas de estabilización. Además, los surcos de arroyada proliferan por el sustrato pizarroso, que se tornará calizo a partir de la siguiente parada.

3.3. Parada 3: Valsecu

A los 5,7 km desde el comienzo del itinerario se accede a la Cueva l'Oscuro, en el sector de Valsecu (1715 m s.n.m.). Esta cubeta glaciokárstica cuenta con una morrena adosada en un lateral que evidencia la circulación de un glaciar durante el pasado. En este sector abundan las formas kársticas de diversos tamaños, como los lapiaces nivales, pero especialmente la susodicha cueva que, con equipo adecuado, se puede explorar, encontrando en su interior gran variedad de espeleotemas.

3.4. Parada 4: circo glaciar del Siega l'Abá

Tras 7 kilómetros desde Tuíza Riba se accede al circo glaciar del Siega l'Abá, que cuenta con paredes subverticales de hasta 300 m de caída, donde existen pedreras plenamente activas a tenor de su aspecto fresco y la inestabilidad que presentan. Esta parada se emplaza sobre una morrena frontal que marcó la última pulsación de este glaciar y que, valle abajo, se puede observar como llegó a construir una sucesión de hasta cuatro pisos de morrenas laterales que evidencian su espesor y tamaño.

3.5. Parada 5: Lleturbiu

A los 8,5 km de ruta se encuentra lago estacional de Lleturbiu, un humedal cerrado por una morrena lateral de un glaciar que circulaba por este valle. Entre las morfologías más destacadas aquí se encuentran algunas dolinas que evidencian la porosidad y el sustrato calizo sobre el que se camina. Asimismo, también se tiene una de las mejores vistas panorámicas hacia El Puerto Güeria, donde existen numerosas morrenas, surcos de arroyada y uno de los mayores humedales del macizo, El Llegu.

3.6. Parada 6: Los Pozos de Corrales

Transcurridos 9,4 kilómetros y superada la mayor cota del recorrido, se llega a la última parada, Los Pozos de Corrales, una cabecera glaciar donde se conservan morrenas de la Fase de Altitud del macizo, así como dolinas y pedreras semiactivas. Desde este punto hasta el final del itinerario se descenderá por un característico valle glaciar abundante en derrubios mixtos de aludes y pedreras.

4. CONCLUSIONES

El itinerario didáctico diseñado se articula en torno a un eje conductor que integra la geomorfología estructural, el análisis de las formas de modelado, el patrimonio geomorfológico y la evolución del paisaje en un sector de media-alta montaña del macizo de Peña Ubiña. A través de una selección de seis paradas estratégicas, la ruta permite la observación directa y la interpretación de un complejo catálogo de geoformas, entre las que destacan depósitos y valles de origen glaciar, cubetas glaciokársticas y una amplia tipología de procesos periglaciares. Asimismo, se pone el foco en el modelado kárstico-nival, representado por lapiaces, dolinas y pozos nivokársticos, junto con la presencia de humedales estacionales de alto valor ecológico. En definitiva, esta propuesta no solo documenta la riqueza física del enclave, sino que se posiciona como una herramienta esencial para la revalorización y la gestión de este espacio natural protegido, donde la fragilidad y el interés científico del relieve exigen estrategias de divulgación precisas y rigurosas.

Agradecimientos

Esta contribución aborda temas de investigación tratados en el proyecto PID2020-115269GB-I00 (MICINN, Gobierno de España), y se enmarca dentro del Grupo de Investigación Reconocido GEA Frost (Universidad de Oviedo; referencia: GR-2024-0012). También forma parte del Proyecto de Innovación Docente «Geoitinerante», de la Universidad de Oviedo, con número de expediente: 235881.

Referencias

- Duval, V. S., & Campo, A. M. (2018). Patrimonio geomorfológico y geodiversidad en las Sierras de Lihué Calel (Argentina). *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, (79), 1-24.
- Feuillet, T., & Sourp, E. (2011). Geomorphological Heritage of the Pyrenees National Park (France): Assessment, Clustering, and Promotion of Geomorphosites. *Geoheritage*, 3, 151-162. <https://doi.org/10.1007/s12371-010-0020-y>.
- Gallinar, D., Ochoa Álvarez, M., García Hernández, C., & Ruiz Fernández, J. (2025). El patrimonio paisajístico y geomorfológico de la alta montaña cantábrica a través de un itinerario por el macizo de Peña Ubiña. *Vegueta. Anuario de la Facultad de Geografía e Historia*, 25(1), 211-235. <https://doi.org/10.51349/veg.2025.1.09>.
- Gallinar, D., Ruiz Fernández, J., García Hernández, C., & Ochoa Álvarez, M. (2024). El patrimonio geomorfológico del Macizo de Peña Ubiña: propuesta de lugares de interés geomorfológico en un espacio natural protegido. *Investigaciones Geográficas*, (81), 131-154. <https://doi.org/10.14198/INGEO.25016>.
- García Hernández, C., Ruiz Fernández, J., & Rodríguez Gutiérrez, F. (2019). El fenómeno de los aludes a través de un itinerario didáctico en la Montaña Cantábrica. *Cuadernos Geográficos*, 58(2), 126-151. <https://doi.org/10.30827/cuadgeo.v58i2.7293>.
- González Amuchastegui, M. J., Serrano, E., & González García, M. (2014). Lugares de interés geomorfológico, geopatrimonio y gestión de espacios naturales protegidos: el Parque Natural de Valderejo (Álava, España). *Revista de Geografía Norte Grande*, (59), 45-64. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022014000300004>.
- Huo, S., & Serrano, E. (2022). El paisaje en las rutas patrimoniales de la «Ruta de la Seda: el corredor Chang'an-Tianshan» (China) y el «Camino de Santiago» en Castilla y León (España). *Revista de Geografía Norte Grande*, (82), 173-192. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022022000200173>.
- Martín Duque, J. F., Caballero, J., & Carcavilla, L. (2012). Geoheritage Information for Geoconservation and Geotourism Through the Categorization of Landforms in a karstic Landscape. A Case Study from Covolagua and Las Tuerces (Palencia, Spain). *Geoheritage*, 4, 93-108. <https://doi.org/10.1007/s12371-012-0056-2>.
- Pica, A., Fredi, P., & del Monte, M. (2015). Geoheritage, geotourist value and itineraries proposal in the Trisulti of Collepardo area (Ernici Mounts, Lazio). *Società Geologica Italiana*, (33), 75-78. <https://doi.org/10.3301/ROL.2015.18>.
- Reynard, E., & Coratza, P. (2016). The importance of mountain geomorphosites for environmental education: examples from the Italian Dolomites and the Swiss Alps. *Acta Geographica Slovenica*, 56(2), 291-303. <https://doi.org/10.3986/AGS.1684>.
- Ruiz Pedrosa, R. M., González Amuchastegui, M. J., & Serrano, E. (2024). Geomorphosites as Geotouristic Resources: Assessment of Geomorphological Heritage for Local Development in the Río Lobos Natural Park. *Land*, 13(2), 1-19. <https://doi.org/10.3390/land13020128>.

Geodiversidade em Áreas Degradadas pelo Garimpo na Amazônia Setentrional Brasileira

Geodiversity in Areas Degraded by Artisanal Mining in the Northern Brazilian Amazon

L. Cunha¹, I. Tavares¹, F. Nascimento¹, A. Gomes²

¹ Universidade Federal de Roraima, departamento de Geografia, Programa de Pós-Graduação em Geografia, UFRR – Campus Paricarana, Av. Cap. Ene Garcês, 2413 – Aeroporto, Boa Vista – RR, 69310-000, luciana.diniz@ufr.br, Brasil

² Faculdade de Letras da Universidade do Porto, departamento de Geografia, Via Panorâmica, s/n, 4150-564 Porto, Portugal

RESUMO

A Serra do Tepequém no estado de Roraima foi intensamente explorada por garimpeiros entre 1930 e 1990, causando remoção da mata ciliar, assoreamento, contaminação por mercúrio e voçorocamento. Apesar da degradação, as marcas deixadas integram a memória local e agregam valor científico e cultural à paisagem. O estudo caracteriza essas áreas degradadas e propõe a valorização da geodiversidade, aliando conservação, educação patrimonial e desenvolvimento sustentável na Amazônia setentrional.

Palavras-chave: *Geodiversidade, Garimpo, Amazônia setentrional, degradação ambiental.*

Keywords: *Geodiversity, Artificial mining, Northern Amazon, environmental degradation.*

1. INTRODUÇÃO

Na porção setentrional da Amazônia, mais precisamente ao norte do estado de Roraima, a imponente serra do Tepequém ergue-se como um marco na paisagem, contrastando com a planície que a circunda. No passado, essa região foi intensamente explorada pela atividade garimpeira, em busca de ouro e diamante. Os leitos dos igarapés Cabo Sobral e Paiva, assim como os canais de voçorocas no topo da serra do Tepequém, foram utilizados para a extração de diamante e ouro por garimpeiros entre o final da década de 1930 e o início dos anos 1990 (Tavares Júnior, 2022).

A intensa exploração de ouro e diamantes desencadeou profundas transformações na paisagem natural da região. Entre os principais impactos ambientais, destacam-se a remoção da mata ciliar, o assoreamento dos cursos d'água, o desvio do igarapé Cabo Sobral, a contaminação do solo e da água por mercúrio, além da aceleração de processos erosivos, como o voçorocamento, e o surgimento de novas feições erosivas na paisagem (Cunha, 2025).

Para Brollo et al. (2002), áreas degradadas resultam do uso inadequado dos recursos naturais, que altera seus estados originais e gera desequilíbrio ambiental e essas alterações manifestam-se pela remoção da vegetação nativa, comprometimento da fauna, deterioração da qualidade da água e do solo, além da poluição e contaminação dos recursos, afetando diretamente a qualidade de vida das populações e dos animais.

Apesar de a geodiversidade da Serra do Tepequém ter sido alterada pela atividade garimpeira, seu contexto histórico está intrinsecamente ligado a essa exploração. Nesse sentido, degradação e memória se complementam: as marcas deixadas na paisagem contam a história do garimpo, e essa narrativa passa a integrar os valores científico, cultural e estético do patrimônio geológico e

geomorfológico local. No Brasil, é possível citar, entre tantas localidades, a Chapada Diamantina - BA e Ouro Preto - MG como exemplos de áreas intensamente exploradas pela atividade garimpeira que, atualmente, contam com circuitos geoturísticos estruturados.

Assim, o presente trabalho tem como objetivo caracterizar as áreas degradadas pela atividade garimpeira no topo da serra do Tepequém e evidenciar o potencial da geodiversidade local para o desenvolvimento do geoturismo. A relevância deste fundamenta-se na necessidade de se repensar as relações entre passado e presente no contexto da Serra do Tepequém, transformando um histórico de degradação ambiental em oportunidade para o desenvolvimento sustentável.

A coleta de dados bibliográficos foi pautada no contexto histórico da atividade garimpeira na região. Em seguida, realizou-se o levantamento em campo dos principais pontos degradados pelo garimpo, considerando também a relevância da geodiversidade local e sua correlação com o geoturismo. A partir dessas etapas, foi possível elaborar um produto interpretativo que integra, de forma didática, o trajeto de acesso e a localização das áreas degradadas, destacando-as como sítios de relevante valor para a geodiversidade da Serra do Tepequém.

Nesse contexto, compreender as marcas deixadas pelo garimpo na Serra do Tepequém torna-se fundamental não apenas para diagnosticar os impactos ambientais, mas também para reconhecer, nessas feições degradadas, um potencial interpretativo e educativo. Ao integrar o histórico de exploração, a caracterização das áreas impactadas e os valores da geodiversidade local, o presente estudo contribui para a valorização do patrimônio geomorfológico da serra, associando a memória do garimpo às possibilidades de uso sustentável por meio do geoturismo.

Por fim, este trabalho fundamenta a construção de uma narrativa integrada sobre a Serra do Tepequém, uma narrativa que reconhece a degradação, mas não se limita a ela, que valoriza a memória do garimpo, mas transcende sua perspectiva predatória, que aposta no potencial educativo e interpretativo da paisagem como caminho para a conservação. Em um cenário amazônico marcado por conflitos socioambientais e pressões sobre os recursos naturais, iniciativas como esta demonstram que é possível conciliar desenvolvimento econômico, valorização cultural e preservação ambiental, transformando cicatrizes do passado em oportunidades para o futuro.

2. CAMINHO METODOLÓGICO DO ESTUDO

A construção metodológica baseou-se no levantamento teórico da produção existente sobre a Serra do Tepequém, áreas degradadas e geodiversidade. A etapa de campo ocorreu em 2025 e concentrou-se em trechos próximos aos Igarapés Cabo Sobral e Paiva com identificação de pontos com evidências da exploração mineral, dessa forma, obteve-se registros fotográficos das feições geomorfológicas alteradas, bem como georreferenciamento desses pontos com auxílio de GPS e registro fotográfico por meio de máquina fotográfica de VANT (veículo aéreo não tripulado). Para indicar o valor qualitativo da geodiversidade nas áreas mencionadas adotou-se como referência a metodologia de Brilha (2005). Na elaboração da carta-imagem utilizou-se dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (2023, 2024), incluindo malhas municipais, rede de drenagem e rodovias, além de arquivos vetoriais em formato SHP (shapefile) referentes a América do Sul, Brasil e estado de Roraima. Além disso, foram usadas imagens de sensoriamento remoto do programa Copernicus, obtidas pelo satélite Sentinel-2 com sensor MSI, de resolução espacial de 10 metros, referentes ao ano de 2023; a imagem foi projetada no sistema de referência SIRGAS2000 e no sistema de projeção UTM, zona 20N. O processamento e a organização dos dados foram realizados no software de Sistema de Informações Geográficas QGIS (versão 3.44).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A identificação e caracterização de áreas degradadas (Figura 1) pela atividade garimpeira permitiu a estruturação de um circuito voltado à valorização da geodiversidade, estabelecendo um diálogo entre degradação ambiental e patrimônio abiótico.

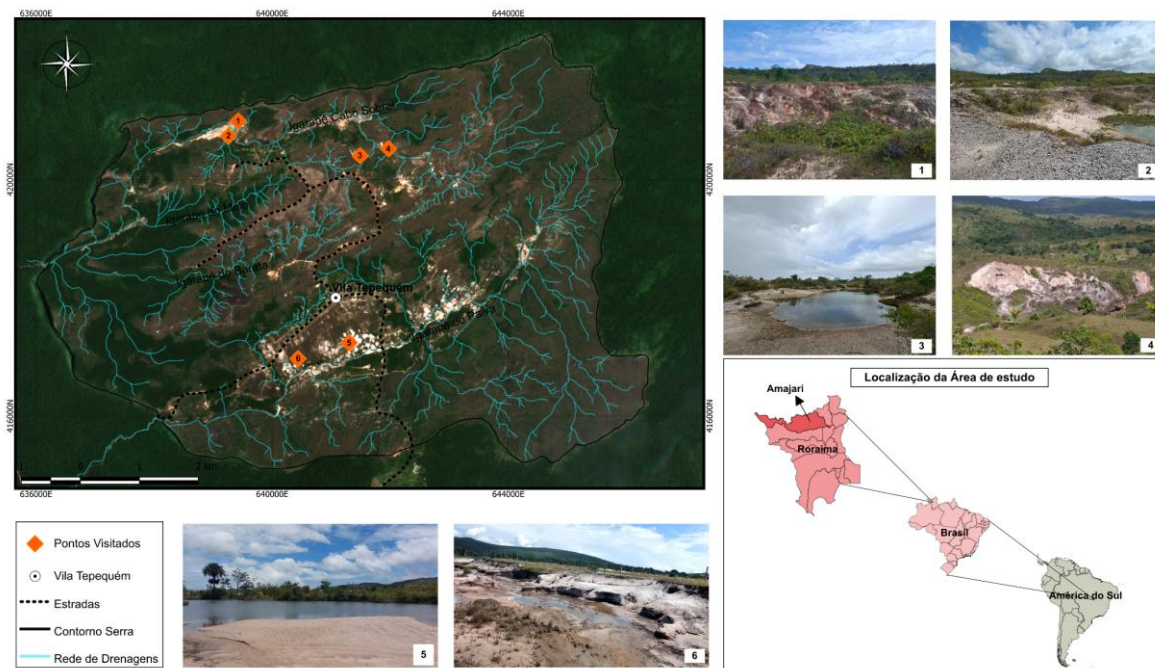


Figura 1. Carta imagem da serra do Tepequém com destaque para as áreas degradadas pelo garimpo, os principais elementos da geodiversidade e a localização da área de estudo, (1) Voçoroca do Cabo sobral; (2, 3) Cavas inundadas circundadas por cascalho; (4) Cava seca; (5) cava inundada circundada por areia média e (6) Voçoroca do Paiva.

Na carta-imagem, os trajetos percorridos revelam não apenas a história inscrita na paisagem, mas também os desdobramentos dos processos geomorfológicos que seguem moldando-a, articulados a um quadro descritivo que integra a área degradada, o valor da geodiversidade, sua abordagem e os processos geomorfológicos associados (Quadro 1).

Quadro 1 – Propostas de valorização da geodiversidade nas áreas degradadas pelo garimpo na serra do Tepequém.

Feição	Memória do garimpo	Valor da geodiversidade	Aplicações	Valorização no roteiro
Voçoroca (Antropizada) Fotografias 1 e 6	Testemunho do desmonte hidráulico, passivo ambiental do garimpo.	Científico Turístico	Estudos de perfil de solo, erosão remontante e regeneração. Ponto de observação da escala do impacto.	Mirante com painel de linha do tempo. Sinalização geotécnica (risco de queda). Vídeo aéreo.
Aluvião e cascalhos (Depósito sedimentar) Fotografias 2,5 e 6	Testemunho físico do ciclo do ouro/diamante, identidade social e econômica do Tepequém.	Científico Cultural Turístico	Estudos de transporte sedimentar, paleoambiente e impacto da mineração. Articular geologia, história e cultura em uma experiência educativa, sensorial e contemplativa.	Estação tátil com amostras. Painel sobre o processo de garimpagem. Conteúdo sobre o contexto histórico-social.

			Ciclo económico que estruturou a ocupação e a identidade do Tepequém.	
Cavas secas (Mineração) Fotografia 4	Método de extração manual e pelo desmonte hidráulico	Científico Cultural Turístico	Permitem analisar a interação entre atividades antrópicas e processos geológicos, servindo como laboratório vivo para pesquisas. Contraste entre passado produtivo e abandono atual.	Trilha interpretativa com totens de fotos históricas. Depoimentos de antigos garimpeiros (áudio).
Cavas inundadas (Mineração, lagos antrópicos) Fotografias 3 e 5	Método de extração manual e pelo desmonte hidráulico.	Científico Cultural Turístico	Contraste entre o azul/verde da água e o solo claro das encostas gera um "atrativo visual" Possibilidade de banho e contemplação, desde que atestada a segurança química (ausência de contaminantes de garimpo antigo).	Painéis sobre a química da água e colonização de ambientes minerados.

4. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos confirmam que as feições resultantes da exploração mineral na Serra do Tepequém constituem não apenas legados da degradação, mas também elementos de interesse sobre a geodiversidade local. A estruturação de um circuito interpretativo, aliada à caracterização geomorfológica e à memória do garimpo, aponta caminhos para o geoturismo como ferramenta de valorização patrimonial e desenvolvimento sustentável, transformando um histórico de impacto ambiental em potencial para a conservação e a educação na região. A caracterização das áreas degradadas pela atividade garimpeira no topo da Serra do Tepequém evidenciou que as marcas deixadas na paisagem, como voçorocas alteradas, cavas e depósitos sedimentares vinculam-se a valores científico, cultural e turístico. Ao integrar memória, geodiversidade e geoturismo, o trabalho demonstra que é possível ressignificar cicatrizes do passado em oportunidades para o desenvolvimento sustentável, conciliando valorização do patrimônio abiótico com práticas interpretativas e educativas na Amazônia setentrional.

Referências

- Brilha, J. Património geológico e geoconservação: a conservação da natureza na sua vertente geológica. Braga: Palimage, 2005. 190 p.
- Brollo, M. J. Barbosa, J. M. Rocha, F. T. Martins, S. E. (2002). Programa comum de pesquisa em caracterização e recuperação de áreas degradadas. In Anais da V Reunião Anual sobre Pesquisa Ambiental: A Pesquisa Científica e Tecnológica e a Gestão Ambiental (pp. 74-82). São Paulo, SP, Brasil.
- Cunha, L. D. Beserra Neta, L. C. Tavares Junior, S. S., Gomes, A. A. T. Nascimento, F. A. (2025). Os valores da geodiversidade da Serra do Tepequém – RR e sua relevância para o geoturismo. In Anais do XV Simpósio Nacional de Geomorfologia (SINAGEO).
- IBGE (2023). Malhas territoriais: Malha Municipal 2024. Rio de Janeiro: IBGE. Consultado em 26 de março de 2026, disponível em <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais.html>
- Tavares Júnior, S. S. (2022). Geologia. In A. A. F. Rivas et al. (Orgs.), Diagnóstico dos Recursos Naturais. Instituto PIATAM / Governo do Estado de Roraima.

Geoheritage quantitative assessment as a support for geoparks' management: case study in the M'goun UNESCO Global Geopark (Morocco)

Avaliação quantitativa de património geológico como suporte à gestão de geoparques: estudo de caso no M'goun Geoparque Mundial da UNESCO (Marrocos)

B. Ouacha¹, F. El Bchari^{2,5}, J. Trindade^{3,5*}, P. Pereira^{3,5}, J. Vieira³, A. Souhel², P. Pereira⁴

¹ Laboratório LGTE, Faculdade de Ciências, Universidade Chouaïb Doukkali, El Jadida, Marrocos

² Departamento de Ciências da Terra, Faculdade Polidisciplinar, Universidade Cadi Ayyad, Safi, Marrocos

³ Departamento de Ciências e Tecnologia, Universidade Aberta, Rua da Escola Politécnica 147, Lisboa, Portugal

⁴ Instituto de Ciências da Terra, Polo da Universidade do Minho, Campus de Gualtar, Braga, Portugal

⁵ Centro de Ecologia Funcional, Universidade de Coimbra, Calçada Martim de Freitas, Coimbra, Portugal

* Jorge.Trindade@uab.pt

RESUMO

Este estudo apresenta a avaliação do património geológico na região de Anergui, no M'Goun Geoparque Mundial da UNESCO (Marrocos). Foram inventariados e avaliados quantitativamente 24 sítios. Os resultados evidenciam elevado potencial para geoturismo e educação, embora com lacunas na documentação científica e necessidade de reforço da gestão e valorização do património geológico local. A metodologia aplicada revela-se eficaz e pode ser aplicada a outros setores do geoparque, apoiando a tomada de decisões informadas para a geoconservação, interpretação e uso sustentável.

Keywords: *Geosites; numerical assessment; criteria; geoparks; geoheritage management; UNESCO.*

Palavras-chave: *Geossítios; avaliação numérica; critérios; geoparques; gestão de património geológico; UNESCO.*

1. INTRODUCTION

Morocco stands out for its geodiversity and rich geological heritage. In recent decades, various global initiatives have sought to strengthen the protection and promotion of geoheritage, highlighting the importance of geological sites in the conservation of geological heritage and its associated values. With this aim, in 2015, UNESCO established the UNESCO Global Geoparks (UGGp) network, incorporating geoparks previously belonging to the Global Geoparks Network (GGN). M'goun became the first UGGp in Africa, representing an exceptional area for geoscientific study. Despite its international relevance and its importance for education, science, geotourism, and regional development (Bussard et al., 2022; Louz et al., 2022), no study has yet carried out a systematic quantitative assessment of the value, use potential, and vulnerability to degradation of geosites in the M'goun UGGp in a way that supports their management. Similarly, there is a lack of information regarding the methods used to select these sites, as well as the possible existence of other, less prominent geosites within the geopark. This research presents the results of a geoheritage assessment conducted in a specific area of the M'goun UGGp, with the aim of identifying and inventorying local sites, evaluating them quantitatively, and proposing

management priorities. The methodology applied can subsequently be extended to other sectors of the territory to establish a comprehensive inventory of geosites within the geopark—including those of international, national, and local relevance—and to support decision-making and management initiatives related to geoconservation, geotourism, institutional visibility, and the optimization of heritage interpretation and mediation strategies.

2. MATERIALS AND METHODS

The M'goun UGGp covers an area of approximately 5,730 km² in the central part of the Moroccan High Atlas Mountains (Fig. 1). With a geological record ranging from the Palaeozoic to the Quaternary, this region is particularly important for understanding the evolution of the Atlas Basin. The Anergui region is located in the northeastern sector of the M'goun UGGp. Its geological record spans from the Upper Triassic to the Middle Jurassic, with locally preserved Tertiary and Quaternary deposits. These sedimentary sequences are intruded by basic magmatic rocks dated from the Middle Jurassic to the Lower Cretaceous. The region landscape is typified by steep limestone and dolomitic cliffs, topped by high karst plateaus featuring lapiaz and sinkholes.

The assessment of the Anergui geosites began with the selection of sites of geological interest, based on existing literature and empirical knowledge of the local geodiversity. Sites with the highest scientific value were selected and inventoried through a qualitative assessment using criteria such as representativeness, rarity, and level of scientific knowledge. When sites exhibited similar characteristics, those with lower value according to the selected criteria were excluded.

The inventoried sites were subsequently subjected to a quantitative assessment to determine their relevance and to support the implementation of appropriate management measures. Although only sites of scientific value were included in the inventory, aspects related to site use and state of conservation were also considered, as the main objective of this assessment is to provide data to support the effective management of geological heritage.

Following the approaches proposed by Reynard et al. (2007), Pereira et al. (2007), and Brilha (2016), the quantitative assessment of the inventoried Anergui geosites was based on four categories of value: scientific value, additional values, use value, and degradation value (Fig. 2). Each category comprises multiple criteria evaluated using indicators on a 0–5 scale (with increments of 1.25). These criteria were weighted to determine the overall value of each site within each category.

3. RESULTS AND DISCUSSION

The results of the geoheritage assessment conducted in the Anergui region of the M'Goun UGGp highlight a diverse and well-structured set of sites that reflect the complex geological evolution of the Central High Atlas. A total of 24 sites were inventoried (Fig. 1), illustrating key tectono-sedimentary processes and geomorphological features associated with the development of the Atlas Basin. This inventory provides a representative framework of the regional geodiversity, encompassing both stratigraphic and structural elements of scientific relevance (Naitouacha et al., 2024).

The quantitative assessment indicates a predominance of sites with low to moderate scientific value, with only a limited number attaining higher levels of significance. Nevertheless, the overall integrity of the sites remains high, suggesting that the geoheritage is generally well preserved. The analysis also reveals a relative lack of scientific documentation for several sites, highlighting important opportunities for further research and improved knowledge dissemination.

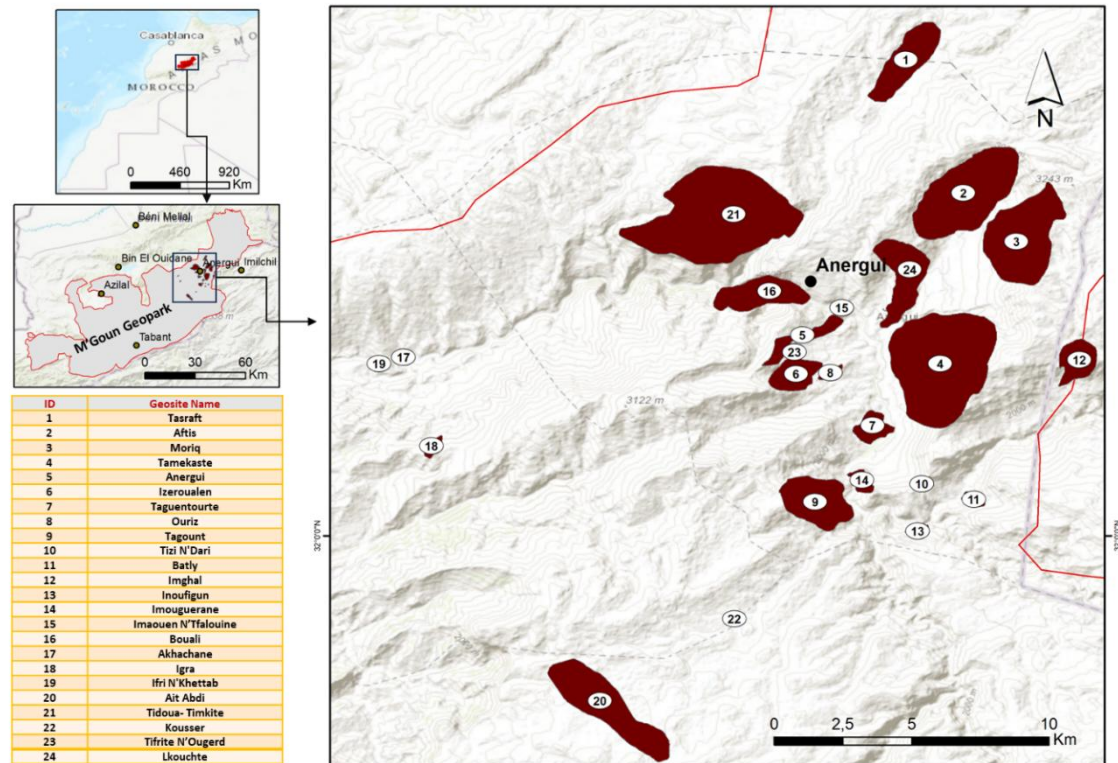


Figure 1. Location of the Anergui region within the M'Goun UNESCO Global Geopark (Morocco), showing the 24 inventoried sites.

In contrast, the evaluation of additional and use values indicates strong potential for geotourism and educational development. Many sites benefit from favourable conditions in terms of accessibility, visibility, and landscape attractiveness, which enhance their suitability for public use. However, this potential is not yet fully supported by adequate scientific interpretation, promotion, or dissemination tools, thereby limiting the effective valorisation of the geoheritage.

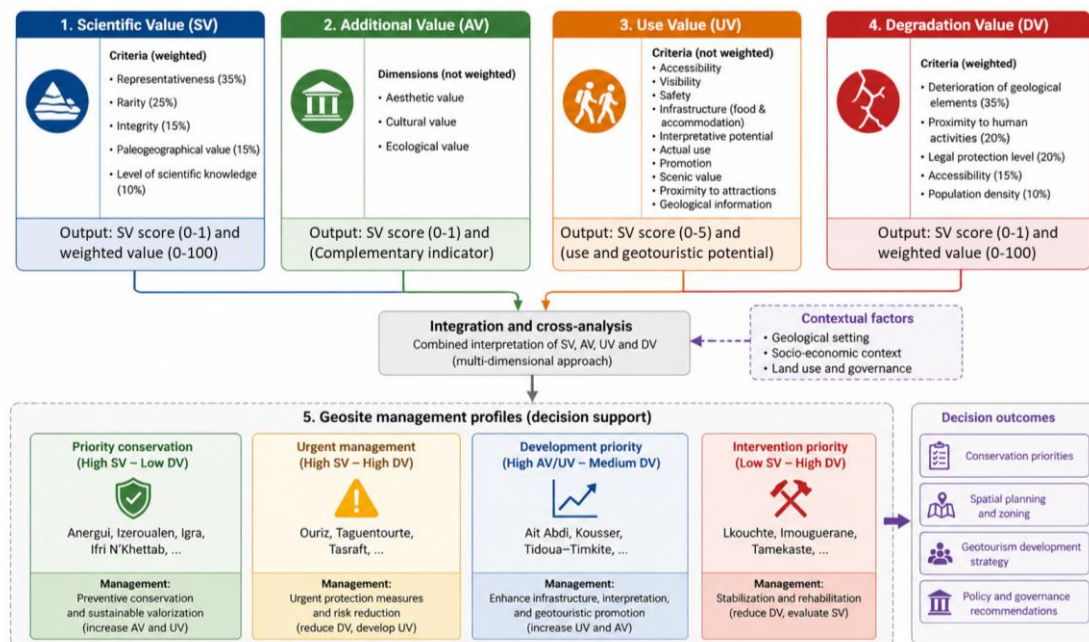


Figure 2. Methodological framework for the quantitative assessment of geoheritage in the M'Goun UNESCO Global Geopark (Morocco), supporting management decision-making.

The assessment of degradation risk suggests an overall moderate level of vulnerability, with most sites showing relatively low exposure to immediate threats. Nevertheless, the results emphasize the importance of strengthening legal protection and management strategies, particularly for the most sensitive sites. Taken together, these findings point to a geoheritage system characterized by high potential but requiring more structured and integrated approaches to conservation, interpretation, and sustainable use.

4. CONCLUSIONS

This study provides the first systematic geoheritage assessment in the Anergui region of the M'Goun UGp, highlighting a geodiverse and well-preserved set of sites representative of the Central High Atlas. Although most sites display low to moderate scientific value, their high integrity and significant geotourism and educational potential underline their relevance for sustainable regional development. Moderate vulnerability levels further emphasize the need for improved protection and management strategies. Overall, the proposed methodology proves effective and can be applied to other sectors of the geopark, supporting comprehensive inventorying and informed decision-making for geoconservation, interpretation, and sustainable use.

References

- Brilha, J. (2016). Inventory and Quantitative Assessment of Geosites and Geodiversity Sites: a Review. *Geoheritage*, 8, 119-134. <https://doi.org/10.1007/s12371-014-0139-3>
- Bussard, J., Martin, S., Monbaron, M., Reynard, E. & El Khalki, Y. (2022). Geomorphological landscapes of the Central High Atlas (Morocco): educative potential and resources for interpretation. *Geomorphologie: Relief, Processus, Environnement*, 28, 173-185. <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.17103>
- Louz, E., Rais, J., Ait Barka, A., Nadem, S. & Barakat, A. (2022). Geological heritage of the Taguelft syncline (M'Goun Geopark): Inventory, assessment, and promotion for geotourism development (Central High Atlas, Morocco). *International Journal of Geoheritage and Parks*, 10, 218-239. <https://doi.org/10.1016/j.ijgeop.2022.04.002>
- Naitouacha, B., Souhel, A., Elbchari, F. & Chafiki, H. (2024). Geological Sites of the Anergui Region: Description and Place in the Alpine Geological History of the M'goun UNESCO Global Geopark (Morocco). *Iraqi Geological Journal*, 57, 264-284. <https://doi.org/10.46717/igj.57.2D.21ms-2024-10-31>
- Pereira, P., Pereira, D. & Caetano Alves, M. I. (2007). Geomorphosite assessment in Montesinho Natural Park (Portugal). *Geographica Helvetica*, 62, 159-168. <https://doi.org/10.5194/gh-62-159-2007>
- Reynard, E., Fontana, G., Kozlik, L. & Scapozza, C. (2007). A method for assessing "scientific" and "additional values" of geomorphosites. *Geographica Helvetica*, 62, 148-158. <https://doi.org/10.5194/gh-62-148-2007>

Assessing the link between hydrodiversity and hydrological geoheritage in Rio Grande do Norte (Brazil)

Avaliação da relação entre hidrodiversidade e geossítios hidrológicos no Estado do Rio Grande do Norte (Brasil)

M. Terto¹, M. Diniz¹, P. Pereira^{2*}

¹ Departamento de Geografia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Caicó, Brasil

² Instituto de Ciências da Terra, Polo da Universidade do Minho, Campus de Gualtar, Braga, Portugal

* paolo@dct.uminho.pt

RESUMO

Apresentam-se os resultados da avaliação da diversidade hidrológica (hidrodiversidade) no estado do Rio Grande do Norte (Brasil), com o objetivo de identificar possíveis correlações entre a hidrodiversidade e a ocorrência de geossítios hidrológicos. Foram utilizados dados cartográficos com recurso a software SIG e uma grelha de 5,5 km para analisar a distribuição espacial de precipitação, caudal dos rios, reservatórios e ordem dos canais. A comparação com dados de uso do solo e com os geossítios hidrológicos inventariados evidencia fraca correlação entre as variáveis.

Keywords: *Hydrological diversity; hydrological geosites; natural heritage; Brazil; water resources.*

Palavras-chave: *Diversidade hidrológica; geossítios hidrológicos; património natural; Brasil; recursos hídricos.*

1. INTRODUCTION

Hydrological diversity (hydrodiversity) refers to the variety of hydrological features found within a given area, encompassing rivers, lakes, aquifers, and other surface and subsurface water bodies. This variability in water resources plays a fundamental role in sustaining life and preserving environmental equilibrium, constituting a core component of geodiversity — a concept that broadly encompasses all abiotic elements of nature. The development of objective and quantitative methods for assessing geodiversity has gained growing relevance in supporting conservation planning, spatial planning, and environmental management. Widely adopted approaches draw on spatial analysis and the use of composite indices. These geodiversity indices are typically built by integrating datasets related to geology, geomorphology, soils, hydrology, and other pertinent environmental variables. The central research question of this study is whether a Hydrodiversity Index can serve as a tool for identifying hydrological geosites, or whether their distribution is linked to specific hydrodiversity patterns. Accordingly, the primary objective is to compute a Hydrodiversity Index based on selected hydrological variables and to compare its spatial distribution with that of previously identified hydrological geosites (Terto et al., 2024). Further objectives include contrasting the Hydrodiversity Index results with the geodiversity index proposed by Dias et al. (2021), as well as with land use patterns in the state of Rio Grande do Norte (Medeiros et al., 2022).

2. MATERIALS AND METHODS

The state of Rio Grande do Norte, located in northeastern Brazil, covers 52,809.6 km² and has a population of approximately 3.3 million inhabitants. Geologically, it lies within the northern Borborema Province and is characterised by a complex lithostructural framework comprising the Jaguaribeano, Piranhas–Seridó, and São José de Campestre domains, along with the overlying Potiguar Basin. Despite its relatively limited extent, the state exhibits pronounced hydrological contrasts. The eastern coastal zone, influenced by higher rainfall, supports dense hydrographic networks with small basins, lagoons, and notable systems such as the Potengi, Ceará–Mirim, and Trairi rivers. In contrast, the central and western interior regions are dominated by larger, predominantly intermittent basins developed over low-relief pediplanation surfaces, including the Piranhas–Açu and Apodi–Mossoró rivers, which are critical for water supply and irrigation. Elevated terrains associated with the Martins Formation (600–780 m) introduce additional geomorphological diversity, giving rise to features such as waterfalls and marking a transition between the humid coastal environment and the semi-arid interior (Terto, 2026). The Hydrodiversity Index for Rio Grande do Norte was developed following the methodological framework of Pereira et al. (2013), in which the index represents the sum of its constituent sub-indices. Both general and specific aspects of hydrodiversity were incorporated, drawing on criteria proposed by Araújo (2016). The analysis was conducted using a 5.5 × 5.5 km² grid, consistent with the spatial resolution adopted by Dias et al. (2021) for the state's Geodiversity Index (Terto et al., 2025; Terto, 2026). The variables integrated into the index include 30-year average precipitation, land use and land cover, river discharge distribution (Araújo et al., 2015), reservoir presence, and river hierarchy based on stream order. Following feature counting, each sub-index was normalised using the Maximum Possible Value (MPV) approach (Gonçalves et al., 2022), which standardises values relative to the highest potential score within each sub-index, minimising distortion and improving data representation. The normalised sub-indices were then summed to produce a composite Hydrodiversity Index map. To enhance spatial interpretation, Inverse Distance Weighted (IDW) interpolation was applied, generating a smoothed spatial distribution. The interpolated values were subsequently reclassified into four categories, defined in accordance with the MPV framework: low (0–1), medium (1–2), high (2–3), and very high (3–4).

3. RESULTS AND DISCUSSION

The Hydrodiversity Index yielded values ranging from 0.38 to 3.22 out of a possible maximum of 4, with most of the state falling within the medium category. The highest values were concentrated along the eastern coast (Fig. 1). This pattern reflects a favourable combination of high rainfall and a denser drainage network, which together enhance water availability — a region historically associated with sugarcane cultivation, an activity dependent on both water and fertile soils. Elevated index values were also recorded in the western portion of the study area, driven by the river's high stream order and the presence of numerous smaller reservoirs in its upper reaches, alongside more prominent ones downstream. This spatial pattern highlights the importance of an integrated approach to understanding the interactions among hydrological variables and their influence on regional water dynamics. IDW interpolation considerably improved the visualisation of spatial patterns, enabling a clearer interpretation of the index's distribution across the state. Compared to the geodiversity index of Dias et al. (2021), the Hydrodiversity Index developed in this study offers a more detailed representation of water resource variability across Rio Grande do Norte, capturing hydrological nuances — such as low-water areas — that a single sub-index cannot adequately reflect. By

incorporating variables including precipitation, discharge, hydrographic networks, and water bodies, the index proves to be a reliable indicator of water resource diversity, with the highest values concentrated along the eastern coast and the Apodi–Mossoró drainage basin. The relationship between the Hydrodiversity Index and hydrological heritage is only partially supported. While 12 of the 22 identified hydrological geosites (Terto et al., 2024) coincide with high hydrodiversity areas (Fig. 1), no sites were recorded in very high hydrodiversity zones, suggesting that hydrological heritage can occur independently of water resource abundance. This reflects the fundamental divergence between geodiversity assessment — which measures elemental richness — and geoheritage evaluation, which prioritises scientific, ecological, cultural, and aesthetic value.

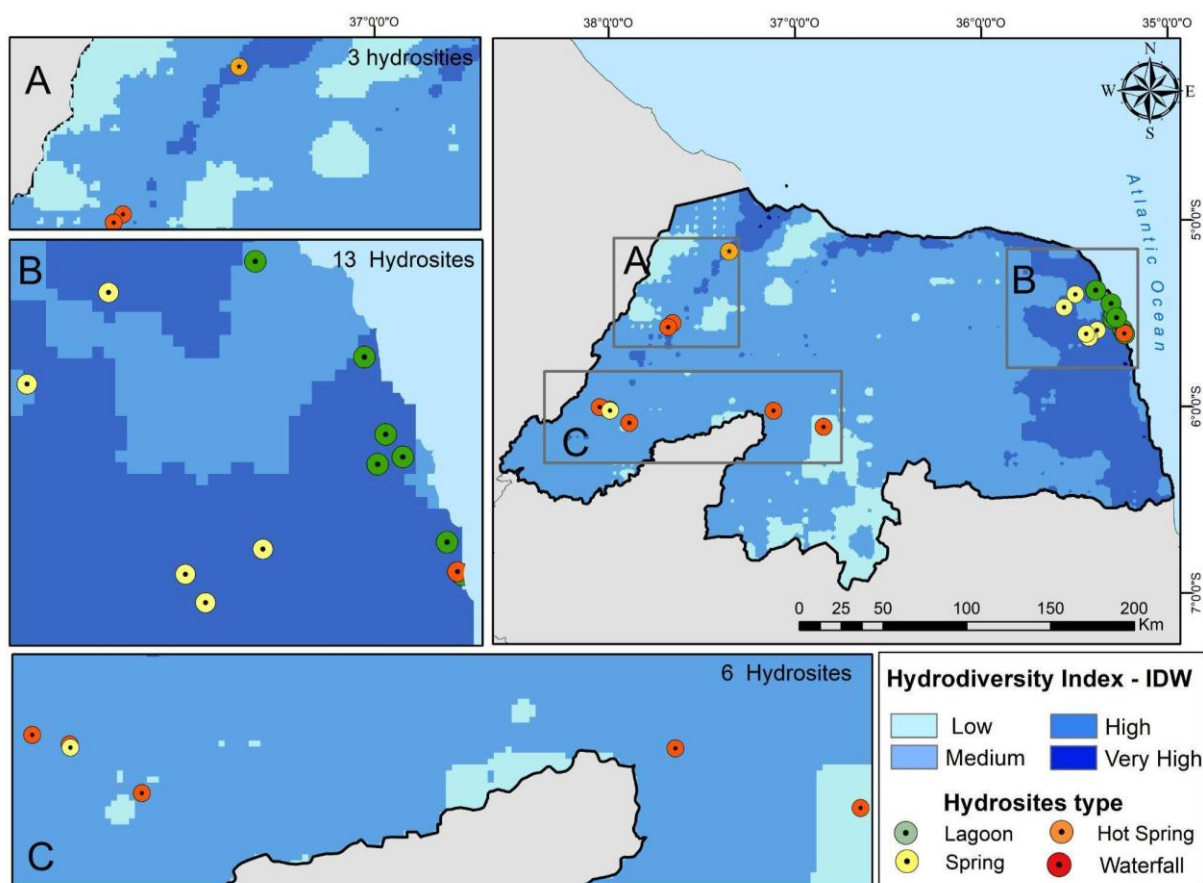


Figure 1. Hydrological geosites inventoried in the state of Rio Grande do Norte, Brazil, overlaid on the Hydrodiversity Index map (Terto et al., 2025; Terto, 2026). The detail is increased for the northwestern (A), eastern (B) and southwestern (C) regions of the state, where the sites concentrate.

Regarding land use, a clear correspondence emerges between high hydrodiversity values and historically water-dependent activities, including irrigated agriculture, shrimp farming, and salt production. The central region, characterised by lower hydrodiversity, is predominantly devoted to livestock farming, further reinforcing the link between water resource distribution and land occupation patterns.

4. CONCLUSIONS

The Hydrodiversity Index successfully captured the spatial distribution of water resources across Rio Grande do Norte, highlighting the contrast between the wetter eastern coast and the drier interior,

and underscoring the critical role of water in environmental and territorial management. Despite limitations in cartographic data availability, the GIS-based methodology proved effective in identifying areas of varying hydrodiversity and refining previous geodiversity assessments, which had treated hydrological components in a more generalised manner. The index has practical applications in integrated territorial planning, particularly for prioritising conservation and the sustainable use of water resources — especially relevant where high hydrodiversity coincides with significant anthropogenic pressure. The relationship between hydrodiversity and hydrological heritage, however, remains limited and should be interpreted with caution. Although most hydrological geosites are located in high hydrodiversity areas, these zones cover much of the state's territory, and no sites were identified in very high hydrodiversity areas. This suggests that hydrological heritage is not strictly determined by water resource abundance. Future research should consider basin-scale analyses incorporating additional hydrological variables, as well as a more comprehensive inventory of hydrological heritage in Rio Grande do Norte, accounting for different levels of site significance and diverse hydrological geosite typologies.

References

- Araújo, A. M. (2016). Avaliação dos recursos hídricos no âmbito da geodiversidade: aplicação ao Estado do Ceará. Tese de doutoramento em Geologia, Universidade do Minho, Braga.
- Dias, M. C., Domingos, J. O., Costa, S. S., Nascimento, M. A., Silva, M. L., Granjeiro, L. P. & Miranda, R. F. (2021). Geodiversity index map of Rio Grande do Norte State, Northeast Brazil: Cartography and quantitative assessment. *Geoheritage*, 13, 10. <https://doi.org/10.1007/s12371-021-00532-4>
- Gonçalves, J., Mansur, K., Santos, D., Henriques, R., & Pereira, P. (2022). Is It Worth Assessing Geodiversity Numerically? A Comparative Analysis between Quantitative and Qualitative Approaches in Miguel Pereira Municipality, Rio de Janeiro, Brazil. *Geosciences*, 12(9), 347. <https://doi.org/10.3390/geosciences12090347>
- Medeiros, F. J., Gomes, R. S., Coutinho, M. D. & Lima, K. C. (2022). Meteorological droughts and water resources: Historical and future perspectives for Rio Grande do Norte state, Northeast Brazil. *International Journal of Climatology*, 42(13), 6976-6995. <https://doi.org/10.1002/joc.7624>
- Pereira, D. I., Pereira, P., Brilha, J. & Santos, L. (2013). Geodiversity Assessment of Paraná State (Brazil): An Innovative Approach. *Environmental Management*, 52, 541–552. <https://doi.org/10.1007/s00267-013-0100-2>
- Terto, M. L., Diniz, M. T., Araújo, I. G., Queiroz, L. S. (2024). Method for evaluating the hydrological heritage of geodiversity: Case study in the Cerrado enclave—Rio Grande do Norte, Brazil. *Geomorphology*, 460, 109265. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2024.109265>
- Terto, M. L., Pereira, P. & Diniz, M. T. (2025). Are Hydrological Geosites Related to High Hydrodiversity? A Study in the State of Rio Grande do Norte, Northeast Brazil. *Hydrology*, 12, 234. <https://doi.org/10.3390/hydrology12090234>
- Terto, M. L. (2026). Hidrodiversidade e patrimônio hidrológico: proposta de avaliação aplicada ao Estado do Rio Grande do Norte, Brasil. Tese de doutoramento em Geografia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

Da Serra dos Órgãos (Brasil) a Montesinho (Portugal): estratégias de interpretação ambiental e geoconservação em percursos pedestres

From Serra dos Órgãos (Brazil) to Montesinho (Portugal): environmental interpretation and geoconservation strategies on hiking trails

F. Pessoa¹ *

¹ Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET/RJ), Petrópolis - Rio de Janeiro, Brasil. Instituto Politécnico de Bragança – Centro de Investigação de Montanha, Bragança, Portugal.

* fernando.pessoa@cefet-rj.br

RESUMO

A pesquisa propõe estratégias de interpretação ambiental do patrimônio geomorfológico em percursos pedestres do Parque Natural de Montesinho, a partir de experiências prévias no Parque Nacional da Serra dos Órgãos. Com base em revisão bibliográfica e trabalhos de campo, foram selecionadas três trilhas com temáticas distintas, onde estão sendo identificados locais de interesse da geodiversidade para elaboração de roteiros nos aplicativos Wikiloc® e Relive®. Os resultados indicam potencial para integrar geoturismo, geoeducação e gestão territorial.

Palavras-chave: *Geoturismo; Montanhismo; Áreas Protegidas.*

Key-words: *Geotourism; Mountaineering; Protected Areas.*

1. INTRODUÇÃO

A partir da compreensão do valor da geodiversidade e das suas ameaças, é possível definir sua necessidade de proteção, por meio de estratégias de geoconservação, além de evidenciar os benefícios do uso adequado dos recursos naturais para as gerações futuras. A geodiversidade pode ser definida como o conjunto de características geológicas, geomorfológicas, hidrológicas e do solo, sendo o equivalente abiótico da biodiversidade, representada a partir dos materiais geológicos, variação topográfica e processos físicos (Gray, 2013), que pode contribuir diretamente na gestão ambiental de diferentes territórios, a partir de uma perspectiva integrada da natureza.

Promover a valorização da geodiversidade e de seu patrimônio geomorfológico em trilhas inseridas em áreas protegidas, a partir de uma perspectiva interdisciplinar, é de suma importância, pois contribui para o uso sustentável e conservação destes territórios e seu entorno. Além disso, possibilita contribuir com ações de disseminação das geociências acerca das áreas protegidas por meio de mecanismos que busquem incentivar e facilitar a experiência dos visitantes, a partir do aproveitamento turístico e educacional.

No Parque Natural de Montesinho (PNM), situado na terra fria transmontana do nordeste de Portugal, suas rochas e formas de relevo, expressas de forma cênica na paisagem, são representativas da exuberância da sua geodiversidade. Assim, estes territórios possuem um significativo valor estético

que possibilita ressaltar outros valores e usos, conforme contribuições de Brilha (2018): em primeiro lugar, um uso científico realizado por geocientistas para produzir conhecimento significativo de como a geosfera trabalha e interage com outros sistemas terrestres (biosfera, hidrosfera e atmosfera); em segundo lugar, um uso educacional aplicado por professores de geociências, apresentando questões referentes aos processos que ocorrem no planeta Terra ao longo do tempo, além de instigar a formação de novas gerações de geocientistas; e, finalmente, certos elementos da geodiversidade que podem justificar uma forma distinta de uso econômico baseado no geoturismo e lazer.

Para ser considerado patrimônio, os elementos da geodiversidade devem ser dotados de valores, não apenas o econômico, como geralmente é destacado, mas também vários outros valores que podem ser evidenciados, tais como: funcional, científico, educacional, intrínseco, cultural e estético. Muitas vezes, um significativo valor estético, como observado em diferentes perspectivas da paisagem no PNM, possibilita ressaltar os demais valores e usos, apesar da sua subjetividade, difícil de ser avaliado com precisão.

As trilhas, também chamadas de percursos pedestres, são, de acordo com Pereira (2006), *“um dos meios para incentivar a prática de atividades ao ar livre e/ou desportivas, bem como a conservação da natureza”*, onde vários locais de interesse geomorfológico podem estar integrados em percursos pedestres, como aponta o autor em sua tese de doutoramento desenvolvida sobre a temática do patrimônio geomorfológico no PNM.

Apesar da sua criação ter sido fundamentada essencialmente em aspectos biológicos, aí ocorrem elementos geomorfológicos de destaque. Pereira (2006), ao realizar a caracterização geomorfológica do PNM, destacou os seguintes compartimentos de relevo: depressão tectónica a norte de Bragança; as superfícies de aplainamento; os relevos residuais; a morfologia granítica; as cristas e vertentes assimétricas em xistos; os vales profundos do setor ocidental, além de aspectos culturais de cunho geomorfológico. Neles, foram inventariados 26 locais de interesse geomorfológico, que constituem o património geomorfológico do PNM. Estes locais são na sua maioria locais panorâmicos, o que reflete a elevada dimensão das geoformas que daí se observam, o destaque para os mirantes nas trilhas e a abordagem sistêmica na escala da paisagem.

No Parque Nacional da Serra dos Órgãos (Parnaso), região serrana do estado do Rio de Janeiro, uma das áreas protegidas mais antigas, pesquisadas e visitadas do Brasil, a interpretação ambiental da geodiversidade nas trilhas, a partir de uma abordagem geossistêmica (Araujo et al., 2022), promove atividades geoturísticas e geoeducativas desenvolvidas com o auxílio do aplicativo de navegação Wikiloc® (Pessoa et al., 2019; 2023). Tais experiências vêm possibilitando desdobramentos em pesquisas de cunho mais teórico sobre património geomorfológico (Pessoa et al. 2025a), de cunho mais básico nas temáticas do mapeamento geológico (Pessoa et al. 2025b) e do relevo granítico (Pessoa et al. 2026), o que possibilita uma troca de experiências entre parques nacionais e instituições académicas do Brasil e de Portugal.

A pesquisa justifica-se a partir da proposta de desenvolvimento das seguintes questões: quais são as estratégias de interpretação ambiental existentes e em potencial desenvolvimento no Parque Natural de Montesinho? Como essas diferentes estratégias dialogam e podem contribuir para o desenvolvimento socioeconómico a partir do turismo, articulado com as comunidades locais e instituições de ensino, pesquisa e extensão?

Para respondê-las, a pesquisa possui como objetivo desenvolver metodologias integradas de interpretação ambiental voltadas à valorização da geodiversidade e do património geomorfológico em percursos pedestres no Parque Natural de Montesinho (Portugal), com base na experiência prévia no Parque Nacional da Serra dos Órgãos (Brasil), a fim de propor roteiros geoturísticos e geoeducativos

digitais que promovam a geoconservação e o fortalecimento dos vínculos identitários entre a sociedade e o patrimônio abiótico.

2. METODOLOGIA

A pesquisa situa-se no Parque Natural de Montesinho (PNM), localizado no nordeste de Portugal, a norte dos concelhos de Bragança e Vinhais, na Terra Fria Transmontana, com 74.224,89 ha e altitudes que variam entre 438 e 1481 metros. Para o seu desenvolvimento, foi realizado amplo levantamento bibliográfico sobre o histórico e a geodiversidade do território desta área protegida, para seleção dos percursos das trilhas.

A identificação das estratégias de interpretação ambiental inclui o diálogo com pesquisadores, professores, estudantes, gestores e visitantes do território. Junto com estes estudos e diálogos, visitas de campo serão realizadas, com a identificação e sistematização das informações dos locais de interesse da geodiversidade ao longo da trilha e devida caracterização dos geomorfossítios identificados. Este levantamento possui como base os dados elaborados por Pereira (2006), articulados com os geossítios e pontos de interesse apresentados no *site* do Parque Natural de Montesinho e da base de dados Geo-Sítios, composta pelo Inventário de Sítios com Interesse Geológico de Portugal.

A elaboração do roteiro geoturístico será realizada com o auxílio do aplicativo de navegação *Wikiloc*®, com a inclusão dos locais de interesse, com fotos e descrições. Para melhor visualização do percurso, também será disponibilizado um vídeo gerado com a utilização do aplicativo *Relive*®, intercalado com imagens obtidas nas visitas de campo. O aplicativo permite a visualização em planta e em perfil da trilha, assim como importar todas as informações no *Google Earth*, além de ser facilmente compartilhado a partir de *links* ou *QR code*, e já ser amplamente utilizado por trilheiros/montanhistas em diversos países.

A metodologia de elaboração dos roteiros a partir do aplicativo de navegação *Wikiloc*® possui o potencial de servir como base para diferentes usos futuros, como a criação de vídeos, associações com estudos já existentes com foco também na biodiversidade e aspectos históricos e culturais, elaboração de materiais para serem divulgados no *site* da área protegida, painéis interpretativos, entre outras formas de popularização do conhecimento.

3. RESULTADOS

Os resultados em andamento indicam a seleção de três percursos pedestres para a elaboração de roteiros interpretativos, atendendo aos critérios de representatividade da paisagem, geodiversidade e patrimônio cultural. São eles:

- (i) Trilho Porto Furado – com percurso circular de aproximadamente 8km, integra paisagens geomorfológicas à um dos roteiros mais conhecidos e visitados do parque;
- (ii) Trilho de Rio de Onor – com percurso circular de aproximadamente 9km, possui elevado interesse etnográfico e paisagístico, ao integrar biodiversidade, patrimônio cultural e paisagens tradicionais;
- (iii) Percurso Pedestre de Ornal - com percurso circular de aproximadamente 8km, possui potencial interpretativo com destaque para a temática da geomorfologia fluvial e seus usos tradicionais.

Os percursos possuem distâncias, desníveis altimétricos e níveis de dificuldade semelhantes, com indicação de uma média de 08 a 10 locais de interesse da geodiversidade em cada um para a elaboração dos roteiros nos aplicativos citados. Os geomorfossítios apresentados serão caracterizados, quantificados e diferenciados dos mirantes existentes, quando necessário.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente pesquisa pretende contribuir para o conhecimento e divulgação da geodiversidade na prática da caminhada em trilha, tendo em vista seu potencial turístico e educativo. Também possibilita avançar no aspecto teórico-conceitual do patrimônio geomorfológico enquanto composto por geomorfossítio e mirantes.

O roteiro elaborado e divulgado por meio de um aplicativo de celular tem o benefício do uso simplificado, acesso ao número de visualizações e *downloads*, além de poder ser atualizado/editado quando necessário e possuir um maior alcance e engajamento público, com importante contribuição na popularização do conhecimento. Assim, será criada uma base que pode ser continuada ao longo do tempo, contribuindo com a inserção da temática em projetos acadêmicos, além de territórios de áreas protegidas e geoparques.

Agradecimentos

Ao Instituto Politécnico de Bragança e seu Centro de Investigação de Montanha. Às equipes do grupo de pesquisa Geoturismo e Patrimônio Geomorfológico em Trilhas e do projeto de extensão Expedições do Cefet/RJ.

Referências

- Araujo, J. C., et al. (2022). Abordagem geossistêmica em trilhas da Mata Atlântica: Geodiversidade, geoética e interpretação ambiental para o atingimento dos ODS da Agenda 2030. *Geociências*, 41(2), 527–541.
- Brilha, J. (2018). Geoheritage: Inventories and evaluation. In E. Reynard & J. Brilha (Eds.), *Geoheritage: Assessment, protection and management* (pp. 69–85). Elsevier.
- Gray, M. (2013). *Geodiversity: Valuing and conserving abiotic nature* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- Pereira, P. J. S. (2006). Patrimônio geomorfológico: Conceptualização, avaliação e divulgação: Aplicação ao Parque Natural de Montesinho (Tese de doutoramento, Universidade do Minho).
- Pessoa, F. A., et al. (2019). Patrimônio geomorfológico e interpretação ambiental em trilhas de montanha (Parque Nacional da Serra dos Órgãos, Rio de Janeiro, Brasil). *Physis Terrae – Revista Ibero-Afroamericana de Geografia Física e Ambiente*, 1(1), 121–138.
- Pessoa, F. A., Peixoto, M. N. de O., Mansur, K. L., & Santos, B. C. dos. (2023). Diálogos sobre geodiversidade, montanhismo e interpretação ambiental: Os caminhos da Travessia da Serra dos Órgãos (RJ). *Turismo, Sociedade & Território*, 5(1).
- Pessoa, F. A., et al. (2025a). Reflexões conceituais sobre a trilha de montanha da Travessia da Serra dos Órgãos (RJ): Um geomorfossítio ou patrimônio geomorfológico? In *Anais do XV Simpósio Nacional de Geomorfologia*. Editora Realize.
- Pessoa, F. A., Tupinambá, M., & Eirado, L. G. (2025b). Rochas magmáticas tardi e pós-colisionais do Órogeno Ribeira na Travessia Petrópolis-Teresópolis (Parque Nacional da Serra dos Órgãos – RJ). In S. Mauri et al. (Eds.), *Caderno da I Semana Acadêmica do PPG em Geociências da UERJ* (p. 42). FGEL/UERJ.
- Pessoa, F. A., et al. (2026). Relevo granítico na Serra dos Órgãos (RJ). In A. M. N. Cardoso (Ed.), *Geomorfologia estrutural* (Vol. 1, pp. 32–48). UERN.

Capítulo VIII - Geomorfologia estrutural

Geomorfologia e Geoarqueologia da Bacia do Rio Verde, Brasil: A Influência do Relevo na Ocupação Humana durante o Holoceno

Geomorphology and Geoarchaeology of the Rio Verde Basin, Brazil: The Influence of Relief on Human Occupation during the Holocene

E. Silva^{1*}, M. Bayer², J. Rubin³, M. Fernandes⁴⁻⁵

^{1/2} Universidade Federal de Goiás - Brasil, Instituto de Estudos Socioambiental (IESA)

³ Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Instituto Goiano de Pré-História e Antropologia (IGPA)

⁴ Universidade de Évora, Centro de Ciências do Mar e do Ambiente (MARE-UE), Apartado 94, 7002-554 Évora

⁵ Universidade de Lisboa, Centro de Estudos Geográficos (CEG-UL), Rua Branca Edmée Marques, 1600-276 Lisboa

*botelho@discente.ufg.br

RESUMO

Este trabalho analisa a influência da geomorfologia, a partir da compartimentação morfoestrutural da bacia do Rio Verde, na distribuição de sítios arqueológicos holocénicos no Brasil Central. A metodologia integrou cartografia geomorfológica, análise paleogeográfica e correlação espacial com unidades litoestruturais. Os resultados evidenciam maior concentração de ocupações humanas nas zonas de erosão remontante associadas ao contacto Serra Geral–Botucatu, destacando o papel do relevo estrutural na organização do povoamento pré-colonial.

Palavras-chave: *Geoarqueologia, Geomorfologia Estrutural, Sudoeste Goiano, Brasil Central.*

Keywords: *Geoarchaeology, Structural Geomorphology, Southwestern, Central Brazil.*

1. INTRODUÇÃO

A paisagem natural da bacia do Rio Verde, situada no Planalto Central brasileiro, especificamente no sudoeste goiano, ultrapassa a mera configuração geomorfológica regional, constituindo-se como um palimpsesto de eventos geológicos que moldaram não apenas o relevo, mas também condicionaram as possibilidades de ocupação humana ao longo dos últimos 12 mil anos, tendo em conta que a bacia do Rio Verde abriga dezenas de sítios arqueológicos registados (Rubin et al. 2025).

2. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A rede de drenagem da bacia do Rio Verde evidencia um forte controle litoestrutural (Souza et al. 2006). Nas áreas de cabeceiras o relevo é marcado por processos de erosão remontante que dissecam o substrato, resultando em topografias irregulares, com elevada densidade de drenagem. Nas áreas mais baixas e acompanhando o canal principal ocorrem extensas áreas planas, terraços e planícies de inundação com controle estrutural local, associadas à dinâmica hidrosedimentar regional (Figura 1). Além disso, a ocorrência de segmentos retilíneos, cotovelos de drenagem e alinhamentos longitudinais

[illegible]

Essa organização do espaço geográfico tem a sua origem no Mesozóico, durante os eventos geodinâmicos associados à fragmentação do supercontinente Gondwana (Souza et al. 2006). O mapeamento geológico regional evidencia a predominância de vulcanismo fissural de larga escala, caracterizado pela ascensão de magmas basálticos ao longo de zonas de fraqueza crustal e lineamentos estruturais profundos. Os derrames basálticos da Formação Serra Geral, ao sobrepor-se às sequências sedimentares eólicas da Formação Botucatu, estabeleceram um mosaico de resistências litológicas contrastantes (Milani et al., 2007) (Figura 2).

¹ - A Bacia do Paraná está localizada na porção centro-leste da América do Sul, abrangendo de forma expressiva as regiões Sudeste, Centro-Oeste e Sul do Brasil.

2 - Latrubese, E.; Carvalho, T. Geomorfologia do estado de Goiás. Boletim Goiano de Geografia, Goiânia, v. 26, n. 1, p. 1-20, 2006.

estritamente um gradiente topográfico catenário, indicando possível controle estrutural do substrato (Ladeira, 2010; Siirtola et al., 2016).

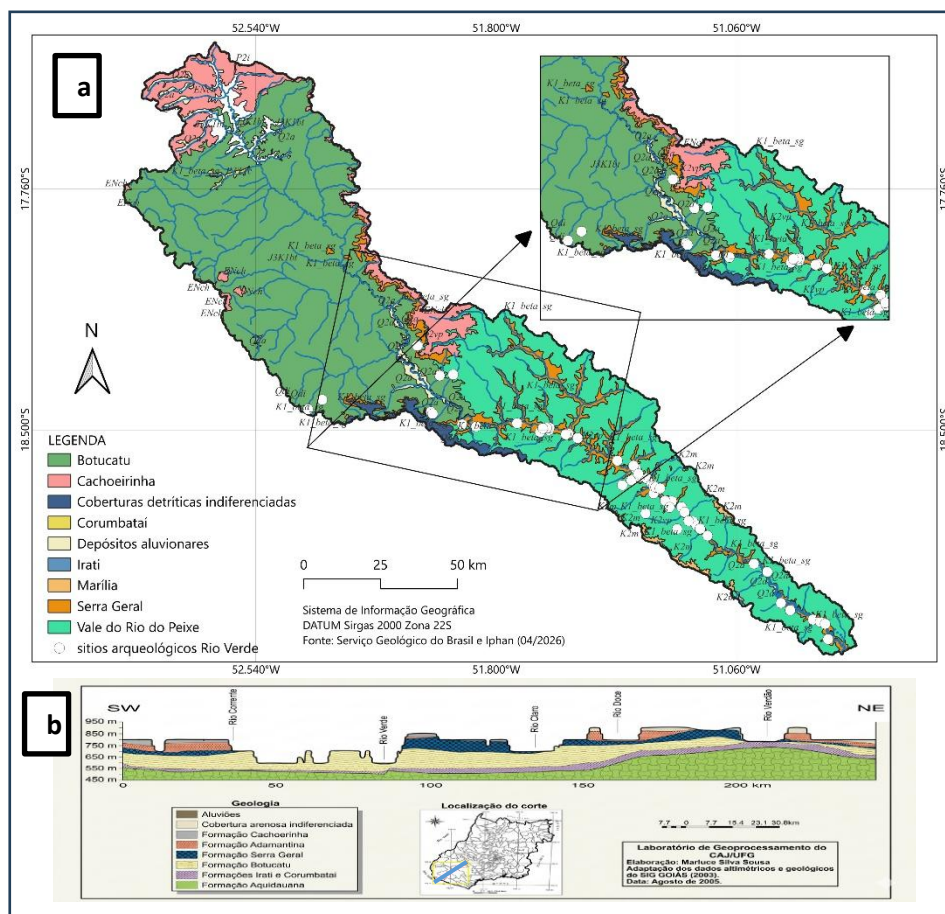


Figura 2. Mapa das formações geológicas da bacia do Rio Verde (elaboração própria); perfil estratigráfico das bacias hidrográficas do sudoeste goiano (adaptado de Souza, M. S. 2006); recorte do perfil estratigráfico da bacia do Rio Verde.

Sob a perspectiva geoarqueológica, a espacialização dos sítios arqueológicos demonstra que o padrão de assentamento pré-colonial na bacia do Rio Verde apresenta forte associação com a compartimentação do relevo. A cartografia geomorfológica revela menor concentração de ocupações nas Zonas de Erosão Remontante (ZER) e nos Patamares e Chapadas (MC), evidenciando baixa ocorrência nas bordas escarpadas e maior concentração nas superfícies regionais de aplainamento (SRA) de nível III, que apresentam elevada densidade arqueológica.

Essa distribuição associa-se ao contato litoestrutural entre os derrames basálticos da Formação Serra Geral e as sequências sedimentares mesozóicas da Formação Botucatu, com destaque para os arenitos eólicos. Nessas zonas de transição, a erosão diferencial e a presença de lineamentos estruturais favoreceram a formação de abrigos sob rocha e cavidades naturais (Rubin et al., 2025). Para além de constituírem suporte físico para habitação e arte rupestre, essas feições geomorfológicas funcionaram como áreas de disponibilidade hídrica local, associadas ao lençol freático e à rede de drenagem, garantindo relativa estabilidade hídrica e recursos ecológicos estratégicos, fatores relevantes para a permanência recorrente de grupos caçadores-coletores na bacia do Rio Verde ao longo do Holoceno (Schmitz et al., 1989; Araújo, 2008).

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O padrão de assentamento pré-colonial no sudoeste do Brasil Central evidencia forte associação entre a distribuição espacial das ocupações humanas e a compartimentação geomorfológica da paisagem (Rubin et al., 2025). A análise espacial demonstra que a concentração dos sítios arqueológicos ocorre, sobretudo, nas superfícies geomorfológicas mais estáveis (SRAIII) e em setores associados às Zonas de Erosão Remontante (ZER), onde o recuo das frentes de cuesta e a erosão diferencial entre os derrames basálticos da Formação Serra Geral e os arenitos da Formação Botucatu favoreceram a formação de abrigos naturais, rupturas de declividade e áreas de disponibilidade hídrica. Nesse contexto, a bacia do Rio Verde não se configura apenas como uma delimitação hidrográfica, mas como um compartimento morfoestrutural estratégico, marcado por elevada diversidade geoecológica e condições favoráveis à mobilidade, ocupação e permanência de grupos caçadores-coletores ao longo do Holoceno.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES).

Referências

- Almeida, F. F. M. (1976). The system of continental rifts at the border of the Paraná Basin, Brazil [O sistema de riftes continentais na borda da Bacia do Paraná, Brasil]. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 48, 15–26.
- Araújo, A. G. M. de. (2008). Geoarqueologia em sítios abrigados: processos de formação, estratigrafia e potencial informativo [Geoarchaeology in rockshelter sites: formation processes, stratigraphy and interpretive potential]. In J. C. R. Rubin & R. T. Silva (Eds.), *Geoarqueologia: teoria e prática* (pp. 73–92). Editora da UCG.
- Ladeira, F. S. B. (2010). Geomorfologia e pedologia: relações e aplicações [Geomorphology and pedology: relations and applications]. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 11(1), 51–60.
- Latrubesse, E. M., & Carvalho, T. M. (2006). Geomorfologia do estado de Goiás [Geomorphology of the state of Goiás]. *Boletim Goiano de Geografia*, 26(1), 1–15.
- Mamede, L., Alvarenga, S. M., Franco, M. S. M., Ribeiro, A. G., & Santos, D. B. (1983). Geomorfologia: folha SE.22 Goiânia [Geomorphology: sheet SE.22 Goiânia]. Projeto RADAMBRASIL.
- Milani, E. J., Melo, J. H. G., Souza, P. A., Fernandes, L. A., & França, A. B. (2007). Bacia do Paraná [Paraná Basin]. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 15(2), 265–287.
- Rubin, J. C. R., Barbosa, J. B., Wesolowski, V., Viana, S. A., Borges, W. R., Silva, R. T., Pires, M. G., Barberi, M., Almeida, I. R., Silva, R. E., Denardin, E. A., & Porto, J. H. (2025). Retomada das pesquisas no Sítio Arqueológico GO-JA-02 (Gruta do Diogo 2), Serranópolis, Goiás [Resumption of research at archaeological site GO-JA-02 (Gruta do Diogo 2), Serranópolis, Goiás]. In J. C. R. Rubin & J. B. Barbosa (Eds.), *Arqueologia: o passado e as camadas do tempo* (pp. 11–102). CRV.
- Schimitz, P. I.; Barbosa, A. S.; Jacobus, A. L.; Ribeiro, M. B.; Barbosa, M. O.; Miranda, A. F. (1989). *Arqueologia nos cerrados do Brasil Central: [Serranópolis I.] São Leopoldo: Instituto Anchieta de Pesquisas (Pesquisas, Antropologia, n. 44).*
- Sousa, M. S.; Scopel, I.; Peixinho, D. M.; Carvalho, N. R. (2006). Compartimentação geomorfológica do Sudoeste de Goiás e relação com a situação de areais. *Anais. VI Simpósio Nacional de Geomorfologia, Goiânia, GO.*

Mapeamento Geomorfológico de Roraima – Amazônia Setentrional (Folhas Surumu e Serra da Lua): Aplicação do SBCR sob o Controlo Litoestratigráfico de Cinturões Orogênicos

Geomorphological Mapping of Roraima – Northern Amazon (Surumu and Serra da Lua Sheets): Application of the SBCR under the Lithostratigraphic Control of Orogenic Belts

S.S. Tavares Júnior¹*, L.C. Beserra Neta¹, R. Vieira¹, S. Akenou¹, A. Gomes²

¹ Universidade Federal de Roraima, Instituto de Geociências, Roraima - Brasil

² Universidade do Porto, Departamento Geografia, CEGOT, Porto - Portugal

* stelio.tavares@ufr.br

RESUMO

Este estudo apresenta o mapeamento geomorfológico das folhas Surumu e Serra da Lua (escala: 1:100.000), regiões norte e central de Roraima, integrando modelagem geomorfológica (MDE ANADEM) e análise tectono-estrutural, operacionalizadas por álgebra de mapas e rotinas em *Python*. Baseado no Sistema Brasileiro de Classificação do Relevo (SBCR), o mapeamento permitiu identificar planaltos, superfícies rebaixadas e planícies, não se verificando a ocorrência de montanhas. A análise revelou que o relevo é controlado pela herança de cinturões Orogênicos, embora persista a dificuldade de distinguir processos de ediplanação e deposição na Formação Boa Vista. Conclui-se que a articulação entre o arcabouço litoestratigráfico e a evolução geodinâmica constitui um fator determinante na compartimentação morfoestrutural da Amazônia Setentrional.

Palavras-chave: *Mapeamento Geomorfológico, Morfometria, Amazônia*

Keywords: *Geomorphological Mapping, Morphometry, Amazon*

1. INTRODUÇÃO

A classificação do relevo brasileiro reflete a transição de critérios puramente altimétricos para abordagens integradas que consideram a complexidade morfoestrutural do território. Historicamente, a heterogeneidade metodológica dificultou a correlação de dados e a unificação cartográfica (CEN/SBCR, 2022). Para sanar essa fragmentação, o Sistema Brasileiro de Classificação de Relevo (SBCR), articulado pelo IBGE e SGB/CPRM, estabeleceu uma taxonomia padronizada fundamentada em macrocompartimentos: montanhas, planaltos, tabuleiros, superfícies rebaixadas e planícies (IBGE, 2025).

A aplicação do SBCR é estratégica na Amazônia, onde o detalhamento do relevo exige equivalência aos avanços geológicos regionais. Em Roraima, no Escudo das Guianas, os níveis taxonômicos demandam compreensão do arcabouço tectônico. Embora modelos clássicos (Tassinari & Macambira, 2004) sejam basilares, o estado da arte aponta para modelos geodinâmicos robustos. A proposta de Fraga et al.

(2024) supera divisões cronológicas ao descrever a acreção de cinturões orogênicos (Cauarane-Coeroeni, Orocaima e Rio Urubu) na Orogenia Akawai.

A configuração estrutural e as anisotropias associadas ao Evento K'Mudku (Fraga & Cordani, 2019) sustentam os marcantes contrastes litológicos que moldam o relevo roraimense. Adicionalmente, o modelo evolutivo proposto por Fraga et al. (2024) fornece a base conceitual para a definição dos 2º (unidades morfoestruturais) e 3º (unidades morfológicas) táxons do SBCR, permitindo o agrupamento das formas de relevo segundo sua gênese e dinâmica evolutiva.

Diante desse arcabouço tectônico e taxonômico, o presente trabalho teve como objetivo realizar o mapeamento geomorfológico de setores das regiões norte e centro-sul do estado de Roraima. Para tanto, integraram-se parâmetros geomorfométricos ao contexto geotectônico regional, conferindo rigor científico à representação da paisagem e fornecendo subsídios para o ordenamento territorial.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O mapeamento dos macrocompartimentos de relevo das folhas topográficas Surumu e Serra da Lua, cuja localização nas regiões norte e central do Estado de Roraima está apresentada na Figura 1, foi realizado com base em domínios litoestruturais distintos. O procedimento metodológico seguiu as diretrizes do SBCR e a articulação cartográfica do IBGE, integrando modelagem geomorfométrica e análise tectono-estrutural:

- Folha Surumu (Norte): A morfogênese é condicionada pelo Cinturão Orogênico Ígneo Orocaima (CIO), com rochas graníticas e vulcânicas félsicas, cujas resistências erosivas definem as formas de relevo (Figura 1 A).
- Folha Serra da Lua (Centro-Sul): Predominam augen-gnaisses e gnaisses migmatizados do Cinturão Orogênico Rio Urubu (CRU), apresentando padrões de dissecação condicionados por esse arcabouço cristalino (Figura 1 B).

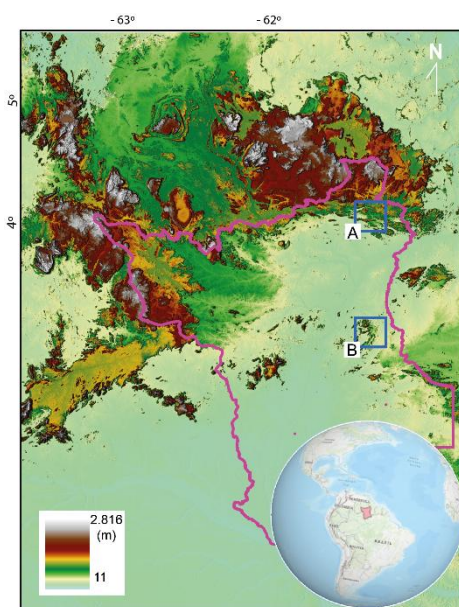


Figura 1. Localização das áreas de estudo (A) Folha Topográfica Surumu e (B) Folha Topográfica Serra da Lua.

A caracterização geomorfológica da área de estudo baseou-se nos dados de altimetria obtidos pelo Modelo Digital de Elevação (MDE) ANADEM, produto com resolução espacial de 30 metros derivado da missão Copernicus. O ANADEM consiste em um modelo do tipo *bare earth*, o qual é adquirido com

a cobertura vegetal e as estruturas antrópicas previamente removidas, o que garante a acurácia intrínseca das variáveis morfométricas extraídas.

O processamento espacial e a modelagem matemática foram executados em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG). Por meio de rotinas automatizadas, extraíram-se as variáveis derivadas do relevo com foco na declividade e na amplitude altimétrica (*range*), esta última calculada por meio da ferramenta *Focal Statistics*. Adicionalmente, aplicou-se a transformação morfológica *White Top Hat* (WTH), técnica essencial para individualizar feições convexas e delimitar planícies.

A definição dos macrocompartimentos fundamentou-se em álgebra de mapas, integrando as variáveis morfométricas e o resultado do WTH. A integração e a segregação automatizada desses compartimentos foram viabilizadas pela execução da seguinte expressão lógica [1] em linguagem Python:

$$\begin{aligned} &\text{Con}(\text{"Declive"} > 150, 1, \\ &\text{Con}(\text{"WTH"} < 2) \& \text{"Amp"} \leq 2, 3, 2)) \end{aligned} \quad [1]$$

onde,

Com corresponde ao comandomda expressão condicional;

Declive corresponde a camada raster com dados de declividade do relevo;

WTH corresponde a camada raster com dados de altura vertical do terreno;

Amp corresponde a camada raster com dados de amplitude altimétrica do relevo.

Essa abordagem permitiu uma segmentação entre áreas aplainadas e compartimentos dissecados, respeitando a integridade técnico-científica das unidades litoestratigráficas regionais. A parametrização adotada fundamentou a compartimentação do relevo no 1º táxon do SBCR, identificando a predominância de três classes a partir de limiares quantitativos:

- Planaltos: áreas caracterizadas por declividade > 15%;
- Planícies: compartimentos identificados via WTH com amplitude altimétrica < 2 metros;
- Superfícies Rebaixadas: zonas de depressão ou áreas aplainadas intermontanas.

Todo o desenvolvimento metodológico, a execução dos algoritmos em Python e o processamento digital dos dados foram realizados no *software* ArcGIS Pro (versão 3.6), mediante cooperação técnica que contou com o suporte institucional da Faculdade de Letras da Universidade do Porto (FLUP).

Para o 2º táxon (unidades morfoestruturais), a análise transcendeu a cronogeologia, focando no comportamento litoestratigráfico e na resposta morfodinâmica. O modelo geotectônico de Fraga et al. (2024) foi correlacionado a dados estruturais de campo e à rugosidade do terreno.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A aplicação da modelagem geomorfométrica via processamento do MDE ANADEM permitiu a geração de mapas de amplitude altimétrica, declividade e áreas aplainadas. Nas folhas Surumu e Serra da Lua, a classe Montanhas não foi registrada, pois as amplitudes não excederam o limiar de 300 metros preconizado pelo CEN/SBCR (2022) e IBGE (2025). A morfologia atual, apesar da complexidade geológica, reflete processos erosivos que priorizam formas planálticas e aplainadas, sem desníveis verticais compatíveis com orógenos de grande magnitude (Figura 2 A e B).

A transição para o 2º táxon (unidades morfoestruturais) correlacionou a morfometria ao arcabouço geológico dos cinturões CIO e CRU (Figura 2 C e D). No setor NE da folha Surumu, identificaram-se planaltos em bacias sedimentares, enquanto na Serra da Lua o relevo estrutura-se sobre uma megaestrutura transpressiva. Essa integração evidencia que a morfogênese regional é controlada pela herança tectônica e competência litoestratigráfica.

Contudo, observou-se ambiguidade na classificação automática de superfícies aplainadas sobre a Formação Boa Vista (CPRM, 2023). A lógica computacional isolada não distingue se a morfologia plana

decorre de deposição ou pediplanação. Tal limitação reforça a necessidade de integrar sensores remotos à interpretação litoestratigráfica, garantindo que o mapeamento e o ordenamento territorial reflitam com precisão a gênese dos macrocompartimentos.

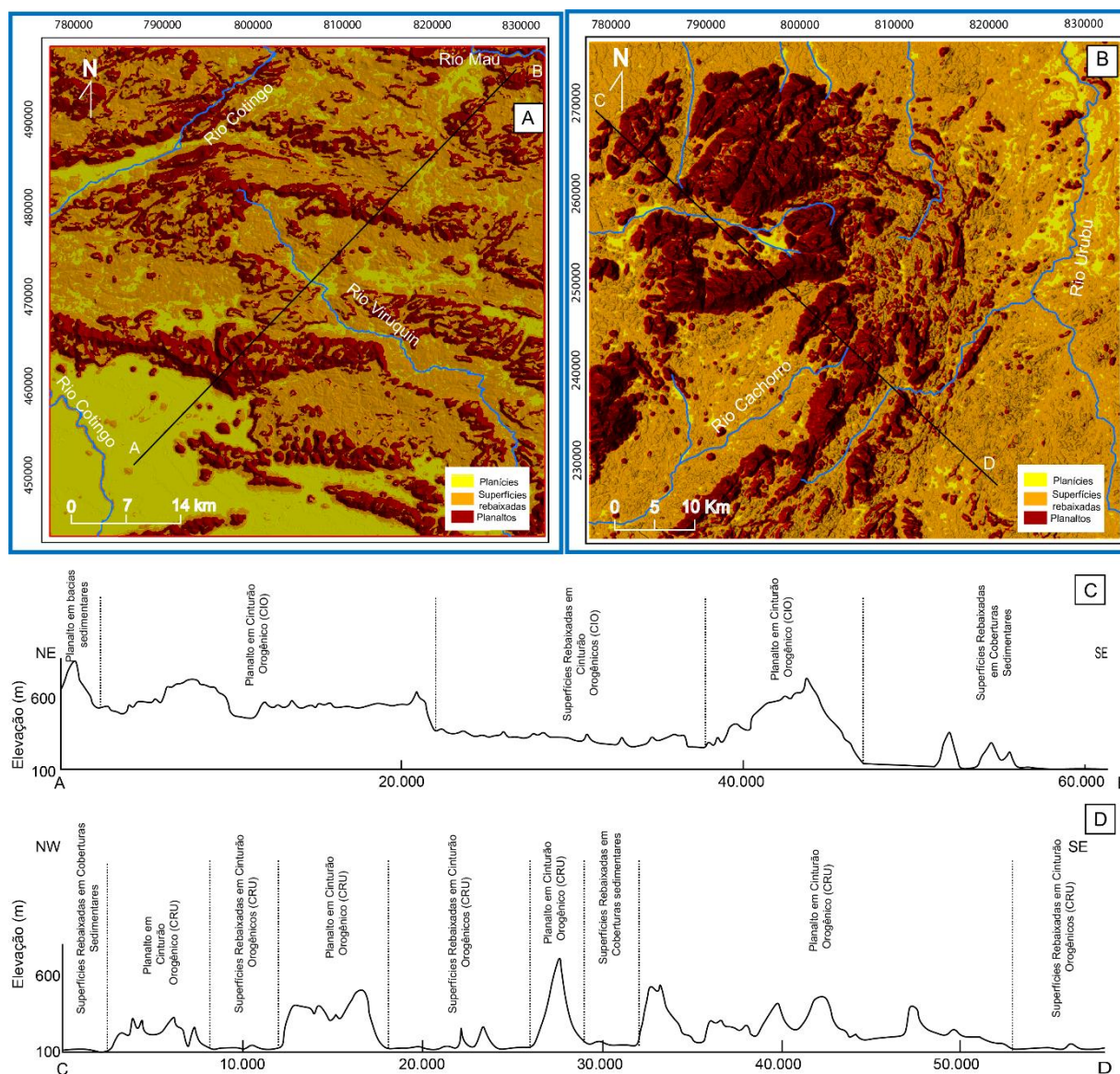


Figura 2. (A) Mapa geomorfológico (1º táxon) da folha topográfica Surumu; (B) Mapa geomorfológico (1º táxon) da folha topográfica Serra da Lua; (C) Perfil topográfico folha Surumu, destacando as unidades morfoestruturais (2ºtáxon); (D) Perfil topográfico folha Serra da Lua, destacando as unidades morfoestruturais (2ºtáxon).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A integração entre modelagem geomorfométrica e análise estrutural permitiu a classificação hierárquica do relevo das regiões das folhas topográficas Surumu e Serra da Lua em Roraima, conforme o SBCR. A distinção entre os cinturões Orocaima e Rio Urubu revelou-se fundamental, pois sua natureza petrográfica e herança tectônica exercem controle direto sobre os macrocompartimentos. Conclui-se que a resposta diferencial dessas unidades geológicas aos processos endógenos e exógenos define a compartimentação regional, estabelecendo um vínculo indissociável entre o arcabouço litoestratigráfico e as formas resultantes. Essa abordagem metodológica confere precisão científica ao mapeamento, superando limitações taxonômicas e subsidiando o ordenamento territorial.

Referências

- CEN/SBCR, (2022) Breve estado da arte do sistema brasileiro de classificação de relevo (SBCR): contribuições de e para a sociedade científica geomorfológica [A brief state-of-the-art overview of the Brazilian Relief Classification System (SBCR): contributions from and to the geomorphological scientific Community]. *Revista Brasileira de Geografia*, v. 67, n. 2, p. 212-227, https://doi.org/10.21579/issn.2526-0375_2022_n2_212-227
- CPRM (2023) Mapa geológico do estado de Roraima [Geological map of the state of Roraima]. Manaus: SGB/CPRM, 1 mapa color. Escala 1:1.000.000. <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/25741>
- Fraga, L.M.B. & Cordani, U. (2019) Early Orosirian tectonic evolution of the Central Guiana Shield: insights from new U-Pb SHRIMP data [Evolução tectônica do Escudo Central das Guianas no início do Orosiriano: novas perspectivas a partir de dados U-Pb SHRIMP]. In: SAXI- XI Inter Guiana Geological Conference. Paramaribo, Suriname. Extended abstract, pp. 59–62. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2024.107362>
- Fraga, L.M., Cordani, U., Dreher, A.M., Sato, K., Reis, N.J., Nadeau, S., Roevers, E., Kroonenberg, S. & Maurer, V.C. (2024) Early Orosirian belts of the central Guiana Shield, northern Amazonian Craton: U-Pb geochronology and tectonic implications [Cinturões do Orosiriano inicial no Escudo das Guianas central, norte do Cráton Amazônico: geocronologia U-Pb e implicações tectônicas]. *Precambrian Research* 407:107362. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2024.107362>.
- IBGE (2025) Relatório Técnico: 3º Workshop sobre o Sistema Brasileiro de Classificação de Relevo [3rd Workshop on the Brazilian System for Classification of Relief]. Rio de Janeiro: IBGE, 20 p.
- Tassinari, C.C.G. & Macambira, M.J.B. (2004) A evolução tectônica do Cráton Amazônico [The tectonic evolution of the Amazonian Craton]. In: Mantesso-Neto, V. et al. (Ed). *Geologia do Continente Sul-americano: Evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*, pp. 471-485. <https://repositorio.usp.br/directbitstream/92ee8375-3d03-4514-a8a9-98c7d6eaba02/1417504.pdf>

Montanhismo Geológico na Serra dos Órgãos (Rio de Janeiro, Brasil)

Geological Mountaineering in the Serra dos Órgãos (Rio de Janeiro, Brazil)

F. Pessoa¹ *

¹ Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET/RJ), Petrópolis - Rio de Janeiro, Brasil.

* fernando.pessoa@cefet-rj.br

RESUMO

O trabalho apresenta o montanhismo geológico como método para investigar as rochas e o relevo a Serra dos Órgãos. Por meio de mapeamento geológico e geomorfológico de detalhe, trabalhos de campo e coleta de amostras na Travessia Petrópolis-Teresópolis e nas Altas Cristas do Dedo de Deus, envolvimento trilhas e vias de escalada, foram identificadas novas relações entre gnaisses, granitos e formas de relevo granítico. Os resultados ampliam o conhecimento sobre a evolução das montanhas brasileiras.

Palavras-chave: Serra do Mar, Montanhismo, Patrimônio Geomorfológico, Parnaso, Geoturismo.

Keywords: Serra do Mar, Mountaineering, Geomorphological Heritage, Parnaso, Geotourism.

1. INTRODUÇÃO

As rochas e o relevo da Serra dos Órgãos motivaram, ao longo da história, diferentes atividades e experiências, desde a prática do montanhismo até a realização de expedições científicas. Essas investigações tiveram início no século XIX, com as primeiras descrições geológicas da serra elaboradas pelos naturalistas Johann Baptist von Spix e Carl Friedrich Philipp von Martius, entre 1817 e o início de 1818, e prosseguiram com as expedições de George Gardner, realizadas entre 1837 e 1841. Destacase a campanha de março a abril de 1841, durante a qual Gardner explorou as áreas mais elevadas da serra e registrou a primeira ascensão documentada à Pedra do Sino, ponto culminante da Serra dos Órgãos, com 2.255 m de altitude.

A notoriedade das suas formas de relevo gnáissico-graníticas se constituiu em uma das motivações para a criação do Parque Nacional da Serra dos Órgãos (Parnaso), em novembro de 1939, e base para as atividades de montanhismo desenvolvidas neste território, com destaque para a conquista do Dedo de Deus, realizada em abril de 1912 e considerado o marco inicial do montanhismo brasileiro.

Em meados do século XX, destacam-se os levantamentos geológicos conduzidos por Georges Frédéric Rosier, realizados principalmente entre 1950 e 1956, culminando na publicação, em 1957, do primeiro mapa geológico regional da Serra do Mar fluminense, abrangendo a Serra dos Órgãos, incluindo seções geológicas detalhadas, e estabelecendo um marco para a geologia pré-cambriana do estado do Rio de Janeiro. Com base em sua publicação (Rosier, 1957), é possível afirmar que foram percorridos trechos da atual trilha da Travessia Petrópolis-Teresópolis, com registros no Morro do Açu, na Pedra do Sino e nos altos divisores da serra, além de observações sobre as Altas Cristas do Dedo de Deus.

Entre os anos 1970 e 1980, mapeamentos geológicos de folhas de 1:50.000 do Estado do RJ, coordenados pelo Departamento de Recursos Minerais (DRM-RJ), especificamente na Folha Itaipava,

apresentam registros semelhantes ao de Rosier. Posteriormente, o Serviço Geológico do Brasil, em parceria com a Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), publicou em 2009 a carta geológica da Folha Três Rios 1:100.000 e, em 2016, o Mapa Geológico do Estado do Rio de Janeiro na escala de 1:400.000 (Heilbron et al., 2016). Os avanços do mapeamento geológico trouxeram melhor entendimento das relações entre os corpos plutônicos gnaissificados e graníticos, mas não ocorreram avanços significativos na cartografia destas rochas, notadamente por questões de escala e dificuldade de acesso.

Assim, o objetivo do trabalho consiste em, a partir da necessidade de estudos de maior detalhe e que ajudem a desvendar a complexidade magmática, oriunda da orogenia neoproterozoica a cambro-ordoviciana (Faixa Ribeira Central), que afloram nessas montanhas: (i) apresentar um percurso metodológico que contemple, a partir da prática do montanhismo geológico, a identificação das rochas da Travessia Petrópolis-Teresópolis e das Altas Cristas do Dedo de Deus; (ii) inventariar e descrever as formas de relevo granítico existentes na Serra do Órgãos, retratando a sua diversidade e apresentando seus principais condicionantes litoestruturais.

2. METODOLOGIA

O percurso metodológico do presente trabalho possui como base a proposição e consolidação do montanhismo geológico. O montanhismo é uma prática esportiva e de lazer que envolve percorrer terrenos montanhosos, caminhando ou escalando, por exemplo, com diferentes níveis de dificuldade e duração (adaptado de CBME, 2018), reconhecido como Patrimônio Cultural Imaterial no Estado do Rio de Janeiro – Lei 9.205/2021.

Já o conceito de montanhismo geológico aqui proposto possui como base o acesso possibilitado à geodiversidade, a partir da associação entre a prática do montanhismo e a compreensão das rochas e formas de relevo dos seus percursos, a exemplo de Ruban e Ermolaev, 2020; Pessoa et al., 2023; e Knight e Bollati, 2024. A partir dele, tem-se o desenvolvimento de pesquisas geocientíficas, atividades geoturísticas e geoeducacionais, notadamente em territórios de áreas protegidas e geoparques. Demanda, assim, atenção às condições de infra-estrutura, planejamento técnico, envolvimento das comunidades locais e gestão de riscos, além de subsidiar ações de geoconservação. A sustentabilidade é inerente ao seu desenvolvimento, com base em princípios de mínimo impacto e geoética, priorizando o zelo pela montanha e seus acessos.

O diferencial do montanhismo geológico é ressaltar o montanhismo enquanto parte do procedimento metodológico para pesquisas geocientíficas básicas, com destaque para seu elevado potencial no desenvolvimento de novas perguntas e áreas de investigação.

O montanhismo geológico na Serra dos Órgãos incluiu: i) revisão dos estudos e cartografia geológica existentes; ii) preparação da base topográfica na escala 1:25.000 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE; iii) cadastro da pesquisa no Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade - ICMBio; iv) trabalhos de campo com anotações sistemáticas e georreferenciadas sobre litologia, relações de contato e dados estruturais dos afloramentos; v) coleta de amostras para estudos petrográficos.

Para classificação das formas reconhecidas em campo, foi considerada a proposta taxonômica de relevos graníticos em macroformas (ex. maciços, lajedos e afloramentos) e microformas (ex. blocos graníticos, formas de fraturamento) e suas subdivisões, de acordo com Bastos et al., 2022.

3. RESULTADOS

As rochas da Serra dos Órgãos estão associadas à raiz de uma cadeia de montanhas gerada na Orogênese Brasileira e durante a formação do Supercontinente Gondwana. Sua litologia inclui: rochas gnáissicas geradas nas fases pré (Complexo Rio Negro, 630-600Ma) e sin-colisional (Suíte Serra dos Órgãos, 580-560Ma), e granitos da fase pós-colisional (Suíte Nova Friburgo, 510-480Ma) (Tupinambá, Teixeira e Heilbron, 2012), com ocorrência de intemperismo diferencial controlado pela litologia e forte incisão nos vales ao longo de falhas e fraturas sub-verticais (Fernandes et al., 2010).

Os resultados indicam o predomínio de ortognaisses tardi a sin-colisionais da Suíte Serra dos Órgãos, com duas fácies petrográficas: a) leucocrática a hololeucocrática pouco deformada; b) mesocrática com enclaves anfibolíticos e dioríticos e, por vezes, com textura milonítica. Injetados nos gnaisses ocorrem granitos pós-colisionais da Suíte Nova Friburgo nas fácies porfírica e inequigranular; titanita-biotita granito equigranular e granitos finos equigranulares na forma de veios cortando as demais rochas. Os granitos da Suíte Nova Friburgo estão distribuídos em corpos mais restritos do que aqueles cartografados em trabalhos anteriores (Pessoa et al., 2025). Em relação às formas de relevo granítico, foram identificadas feições do tipo: (i) blocos graníticos, abrangendo boulders isolados (boulders) e agrupados (caos de blocos), tors do tipo nubbins e castle koppies; (ii) formas de dissolução do tipo alvéolos, caneluras, gnammas e flared slopes; e (iii) formas de fraturamento, como o split rock e polygonal cracking (Pessoa et al., 2026).

A atualização em andamento da seção geológica das Altas Cristas do Dedo de Deus, composta pelos cumes do Escalavrado, Dedo de Nossa Senhora, Dedo de Deus, Cabeça de Peixe e Santo Antônio, realizada com trabalhos de campo em suas trilhas e vias de escalada, possui os seguintes registros: (i) as trilhas para o Escalavrado e para a base da escalada do Dedo de Nossa Senhora possuem predomínio de granito porfírico pós-colisional, sendo o gnaiss do Complexo Rio Negro a rocha encaixante, presente no início dos seus percursos; (ii) a escalada pela via Leste (Maria Cebola) no Dedo de Deus evidencia uma intercalação entre gnaisses do Complexo Rio Negro e granitos da suíte Nova Friburgo, com predomínio dos granitos a partir do lance técnico da Maria Cebola, com destaque para o padrão de fraturamento desta rocha. Porém, no cume há um enclave com contato evidente entre granito e gnaiss; (iv) as trilhas para os cumes do Cabeça de Peixe e Santo Antônio possuem predomínio de gnaisses leuco a hololeucocráticos da Suíte Serra dos Órgãos, com a ocorrência dos granitos somente próximo ao cume, nos últimos metros do percurso; (v) o contato regional entre o Complexo Rio Negro e a Suíte Serra dos Órgãos está entre o Dedo de Deus e o Cabeça de Peixe.

Destaca-se que as rochas graníticas são mais resistentes ao intemperismo que rochas gnáissicas, porém, na Serra dos Órgãos a litologia sozinha não explica a gênese e formas resultantes deste relevo, condicionado principalmente pelo padrão de fraturamento, alguns preenchidos por diques de diabásio mapeados nesta pesquisa. Os contatos entre granitos e gnaisses seguem como importante questão a ser respondida, a fim de entender a geometria dos corpos graníticos enquanto diques e soleiras, assim como a questão da importância das falhas geológicas, tendo em vista as poucas evidências encontradas nos campos realizados.

Informações geocientíficas ilustradas sobre a Travessia Petrópolis-Teresópolis podem ser acessadas no link: https://www.instagram.com/p/DQNLidPj_se/?igsh=MWQ5amZ0MWFseThyZA==; e, num contexto mais amplo da Serra do Mar, no link: https://www.instagram.com/p/CiiN9zgu_al/?igsh=MWpzbXV3Z3o0Y3ltOQ==.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados sobre as rochas e o relevo da Serra dos Órgãos, obtidos em escala de detalhe a partir da prática do montanhismo geológico, demandam pesquisas sobre o controle estrutural ali exercido e também a atualização do mapa geológico do Estado do Rio de Janeiro.

Etapas em andamento incluem análises petrográficas, estruturais e geocronológicas, finalização do mapa e seções geológicas, integradas à uma abordagem patrimonial da geodiversidade no contexto do Projeto Geoparque Montanhas.

Agradecimentos

Ao Laboratório de Estudos Tectônicos (LET-Tektos) e ao Programa de Pós-Graduação em Geociências (PPGEO) da Faculdade de Geologia da Universidade do Estado do Rio de Janeiro; Ao Parque Nacional da Serra dos Órgãos; À equipe do grupo de pesquisas Geoturismo e Patrimônio Geomorfológico em Trilhas.

Referências

- Bastos, F. H., et al. (2022). Relevos graníticos do nordeste brasileiro: Uma proposta taxonômica. In O. A. C. Júnior, M. C. V. Gomes, R. F. Guimarães, & R. A. T. Gomes (Eds.), *Revisões de literatura da geomorfologia brasileira* (pp. 737–762). União da Geomorfologia Brasileira.
- CBME – Confederação Brasileira de Montanhismo e Escalada (2018). *Princípios e valores domontanhismo brasileiro*.
- Fernandes, N., et al. (2010). Rio de Janeiro: Metropolis between granite-gneiss massifs. In P. Migoñ (Ed.), *Great geomorphological landscapes of the world* (pp. 89–100). Springer.
- Heilbron, M., et al. (2016). Mapa geológico e de recursos minerais do estado do Rio de Janeiro (Escala 1:400.000). CPRM – Serviço Geológico do Brasil.
- Knight, J. e Bollati, I.M. (2024), Rock climbing sites as locations for geoheritage and geoscience engagement in mountains. *Geology Today*, 40: 223-227.
- Pessoa, F. A., et al. (2023). Diálogos sobre Geodiversidade, Montanhismo e Interpretação Ambiental: os caminhos da Travessia da Serra dos Órgãos (RJ). *Turismo, Sociedade & Território*, v. 5, p. 1-19
- Pessoa, F. A., et al. (2025). Rochas magmáticas tardi e pós-colisionais do Órogeno Ribeira na Travessia Petrópolis-Teresópolis (Parque Nacional da Serra dos Órgãos – RJ). In S. Mauri et al. (Eds.), *Caderno da I Semana Acadêmica do PPG em Geociências da UERJ* (p. 42). FGEL/UERJ.
- Pessoa, F. A., et al. (2026). Relevo granítico na Serra dos Órgãos (RJ). In A. M. N. Cardoso (Ed.), *Geomorfologia estrutural* (Vol. 1, pp. 32–48). UERN.
- Rosier, G. F. (1957). A geologia da Serra do Mar, entre os picos de Maria Comprida e do Desengano (Estado do Rio de Janeiro). Serviço Gráfico do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.
- Ruban, D. A. e Ermolaev, V.A. Unique Geology and Climbing: A Literature Review. *Geosciences*. 2020; 10(7):259.
- Tupinambá, M., Teixeira, W., & Heilbron, M. (2012). Evolução tectônica e magmática da Faixa Ribeira entre o Neoproterozoico e o Paleozoico Inferior na região serrana do Estado do Rio de Janeiro, Brasil. *Anuário do Instituto de Geociências*, 35, 140–151.

Geological and landscape evolution during the last ~4.5 Ma of the SSW coastal zone of mainland Portugal

Evolução geológica e da paisagem nos últimos ~4.5 Ma, na zona costeira do SSO de Portugal continental

P. P. Cunha ^{1*}, S. Abbasi ¹, A. Gomes ², A. A. Martins ³, D. Moreno ⁴

¹ University of Coimbra, MARE - Marine and Environmental Sciences Centre / Associate Laboratory ARNET, Earth Sciences Department – FCTUC. *pcunha@dct.uc.pt

² CEGOT - Centre of Studies in Geography and Spatial Planning, Faculty of Arts and Humanities of the Univ. of Porto

³ ICT – Institute of Earth Sciences, Department of Geosciences, University of Évora

⁴ CENIEH ESR Laboratory, Burgos, España

ABSTRACT

This study investigates the geological and landscape evolution of Portugal's SSW coastal zone and inland sectors, over the last 4.5 Ma. The research is supported by geomorphological, stratigraphic, and tectonic analyses which were integrated with available OSL and NTC numerical dating ages. The interpretation of data reveals that the culminant UBS13 unit (~4.5–1.8 Ma; uppermost Zanclean to Gelasian) shows altimetric variations linked to active faults. Up to eight coastal and fluvial terrace levels were identified. Since ~1.8 Ma, continuous regional uplift, climate change in the drainage basin, and the strong eustatic oscillation have driven the formation of staircases of fluvial and coastal terraces. Differential tectonics were also identified affecting the terrace staircases.

Key-words: *long-term landscape evolution; culminant sedimentary unit; terrace staircase; active faults; Plio-Pleistocene*

Palavras-chave: *evolução da paisagem, de longo-termo; unidade sedimentar culminante; escadaria de terraços; falhas activas; Plio-Plistocénico*

1. INTRODUÇÃO

Across western and southern mainland Portugal, an extensive siliciclastic unit occupies the uppermost position in the sedimentary infill of several Cenozoic basins. This unit, previously defined as the allostratigraphic unit UBS13, spans from uppermost Zanclean to Gelasian (Cunha, 2019).

The study area extends along the Atlantic coastal sector between Setúbal and Sagres, covering approximately 176 km (Fig. 1).

Previous research includes several studies (e.g. Figueiredo, 2015; Ressurreição, 2019; Ramos-Pereira & Ramos, 2020; Goya et al., 2024). The main objectives of this study are:

- (1) to evaluate the relative influence of key controls on sedimentary system evolution—namely tectonics, eustasy, climate within drainage basins, and substrate resistance—during the Zanclean to late Pleistocene;
- (2) to correlate fluvial terraces with adjacent coastal terrace staircases;
- (3) to estimate regional and differential uplift;
- (4) to reconstruct long-term landscape evolution over the last ~4.5 Ma.

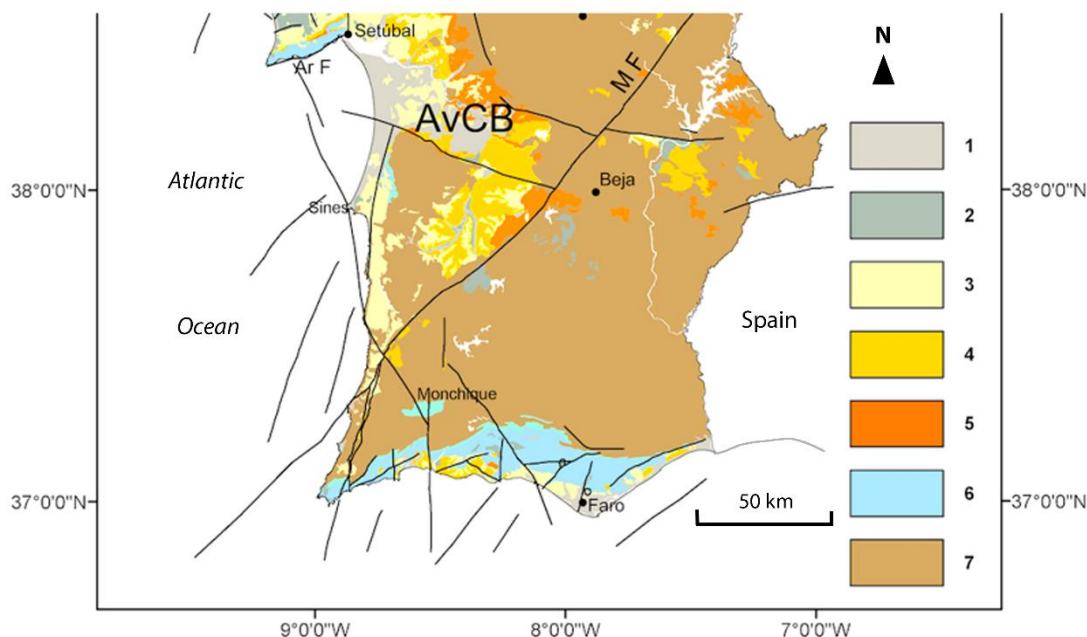


Figure 1. General simplified geological map of southern mainland Portugal (adapted from Cunha, 2019). The study area is the westernmost Atlantic coastal zone. Legend: 1—Holocene; 2—Upper to Middle Pleistocene; 3—uppermost Zanclean to Gelasian; 4—Miocene; 5—Paleogene; 6—Mesozoic; 7—Paleozoic and Proterozoic. Abbreviations: AvCB - Alvalade Cenozoic Basin; ArF - Arrábida Fault; M F Messejana Fault.

2. METHODS

This study integrates geomorphological, stratigraphic, sedimentological, and tectonic analyses, including the assessment of probable active faults. These approaches are complemented by numerical dating techniques. OSL and ESR methods are being applied to establish a chronological framework for the culminant unit, as well as for the fluvial and coastal terraces.

3. RESULTS

The culminant sedimentary unit of the Alvalade Cenozoic Basin corresponds to the extensive UBS13 unit, here dated from ~4.5 to ~1.8 Ma based on cosmogenic methods (Figueiredo, 2015; Ressurreição, 2019). Along the piedmont of eastern N–S-trending reliefs, UBS13 is represented by alluvial fan debris flow deposits, which change distally to gravelly coarse sands deposited by perennial braided streams. Westwards, these deposits grade into a broad coastal fluvial system and subsequently into shallow marine environments. The climate was hot and humid. Along the top of the coastal cliff, the surface of UBS13 is at ~45 m amsl (Sagres), increasing to ~90 m amsl (Praia do Amado). A little more to the north is, constantly, at a 48 m amsl until Pontal da Carrapateira. However, from Praia da Bordeira (69 m amsl) to Praia da Arrifana (~120 m amsl) it is progressively higher. From Ponta da Atalaia (70 m amsl) to Praia da Angra da Cerva/Burdo (61 m), it changes significantly. From Praia do Malhão Sul (22 m amsl) to Praia do Carvalhal/Lagoa Formosa (~50 m amsl), it also changes a lot. These variations in the altitude of UBS13 can be related to active faults. At Vila Nova de Milfontes, eight terrace levels were identified below UBS13, and can be correlated with the eight levels of the coastal staircase (at 4 m, 7 m, 11 m, 14 m, 18 m, 24 m, 27 m and 42 m amsl). Differential uplift across the study area is evidenced by the vertical displacement of the geomorphic markers, suggesting probable active faults.

4. DISCUSSION

During the late Zanclean, a major marine transgression led to a widespread marine incursion across the region (Fig. 2). Within the uppermost Zanclean to Gelasian sedimentary record, several depositional units were identified.

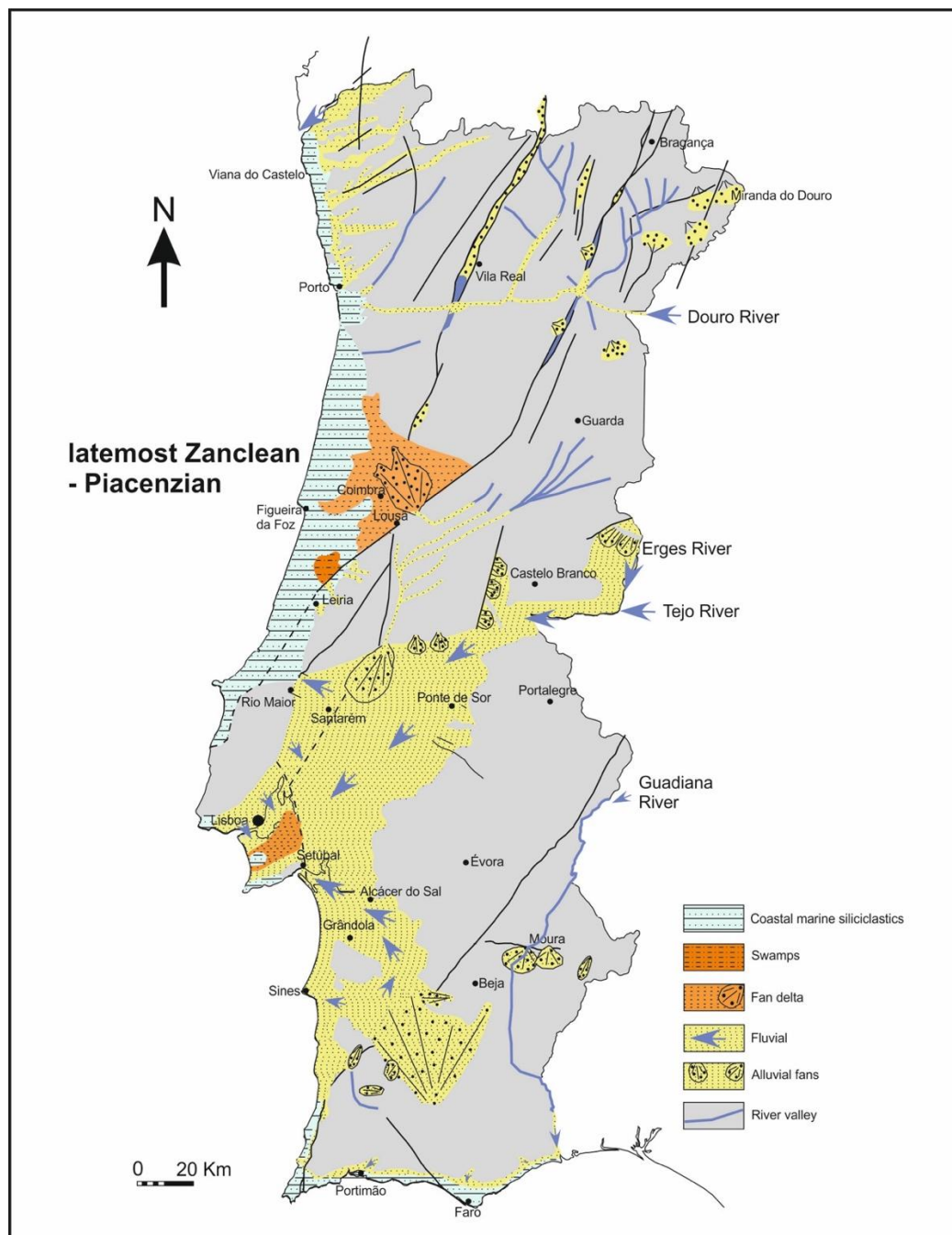


Figure 2. Paleogeographic reconstruction of mainland Portugal for the latest Zanclean and beginning of the Piacenzian (ca. 4.5–4 Ma) (Cunha, 2019). The study area is the western coastal zone located south of Setúbal.

Since ~1.8 Ma, ongoing regional crustal uplift, combined with predominantly low sea-level conditions during the Middle to Late Pleistocene, has driven a stage of fluvial incision. This stage was controlled by base-level fluctuations associated with glacio-eustasy, climatic variations within the drainage basins (influencing weathering, discharge, and vegetation), and differential uplift linked to local active faulting, all superimposed on a long-term crustal uplift trend at the million-year scale.

The Mira River experienced alternating phases of incision (dominated by stream power and bedrock erosion) and lateral valley expansion (dynamic equilibrium), interspersed with periods of sedimentary aggradation (when resistance to erosion prevailed). These processes ultimately led to the development of the observed river terrace staircases.

Differential uplift is documented across several sectors of the study area. The vertical displacement of geomorphic markers further supports the presence of probable active faults.

5. CONCLUSIONS

The allostratigraphic unit UBS13 (uppermost Zanclean–Gelasian) occupies a culminant position in the sedimentary infill of the Alvalade Cenozoic Basin, across both coastal and inland sectors.

In inland areas, it is represented by low-gradient alluvial fans comprising debris flow deposits (apex) transitioning distally into braided sandy streams. The alluvial fans were tributaries of river systems draining towards an extensive coastal plain and, further west, into a shallow marine siliciclastic platform. The base of UBS13 is marked by an angular unconformity, locally expressed as a wave-cut platform developed on resistant limestone and overlain by shallow marine sediments. Underlying UBS13, Middle and Upper Pleistocene terrace staircases comprise up to eight levels of fluvial and coastal terraces, currently under chronological investigation using ESR dating. Uppermost Pleistocene aeolian dune fields are preserved inland, while the Holocene record includes coastal dunes, alluvial plains and sandy beaches.

Funding

This work was supported by Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P., including the doctoral grant 2025.04614.BD (Samira Abbasi), and projects UID/04292/2025 (MARE – Marine and Environmental Sciences Centre) and LA/P/0069/2020 (ARNET Associate Laboratory) (DOI: <https://doi.org/10.54499/LA/P/0069/2020>).

References

- Cunha, P. P. (2019). Cenozoic Basins of Western Iberia: Mondego, Lower Tejo and Alvalade basins. The Geology of Iberia: A Geodynamic Approach. Springer, Vol. 4, Chapter 4, pp. 105-130.
- Figueiredo, P. M. (2015). Neotectonics of the Southwest Portugal Mainland: Implications on the Regional Seismic Hazard. PhD Dissertation. University of Lisbon, Portugal.
- Goya, J. L., Roquero, E., Zazo, C., Moura, D., Dabrio, C. J., Boski, T., Martínez-Graña, A., Lario, J. & Bardají, T. (2024). Paleolandscape evolution along the coasts of the Baixo Alentejo (Portugal) during the Quaternary. *Quaternary International*, 706, 60–75.
- Ramos-Pereira, A. & Ramos, C. (2020). The Southwest coast of Portugal. In: Vieira, G., Zêzere, J.L., Mora, C. (Eds.), *Landscapes and Landforms of Portugal*, 8. Springer, pp. 109–115.
- Ressurreição, R. (2019). Evolução tectono-estratigráfica cenozoica do litoral alentejano (Melides-Odemira) e enquadramento no regime geodinâmico actual. PhD Thesis, Univ. Lisboa, 296 p.



**ISBN: 978-989-
96462-9-2**