

Coordenadores:

António Vieira

Adélia Nunes

Bruno Martins

**XV ENCONTRO
NACIONAL
de RISCOS**



Risco de Movimentos em Vertentes. Aprender com o Passado



RISCOS

**Associação Portuguesa de Riscos, Prevenção e Segurança
Coimbra, 2025**

Risco de Movimentos em Vertentes. Aprender com o Passado

divide-se em duas partes, a primeira intitulada *“Movimentos em vertentes em Portugal”*, inclui seis capítulos dedicados à análise de riscos geomorfológicos em território nacional, maioritariamente centrados no território do arquipélago açoriano. A segunda parte intitulada *“Movimentos em vertentes no Brasil”*, fazem parte cinco capítulos, todos eles dedicados a problemáticas relacionadas com os riscos geomorfológicos, mormente os movimentos em vertentes, aplicados em diversas regiões do território brasileiro, ampliando a discussão de ocorrências do mesmo risco em realidades e contextos edafoclimáticas diferentes.

Este livro reúne textos de comunicações apresentadas no XV Encontro Nacional de Riscos, conjuntamente com outros contributos versando as mesmas problemáticas, procurando dar sequência aos objetivos a que nos tínhamos proposto com a organização do XV Encontro Nacional de Riscos e que eram os de promover a discussão em torno dos processos naturais responsáveis pela ocorrência dos riscos geomorfológicos, nomeadamente os associados aos movimentos em massa, e dos efeitos que estes causam sobre a sociedade, procurando retirar alguns ensinamentos dos diversos acontecimentos passados nefastos que têm ocorrido.

Trata-se de uma obra que salienta a importância de discutirmos estes eventos catastróficos, de forma inter e pluridisciplinar, procurando entender as suas causas, condicionalismos e consequências, por forma a estarmos melhor preparados e capacitados para gerir de forma mais eficiente futuras ocorrências, procurando sensibilizar as populações e aumentar a sua resiliência.

António Vieira

Professor Associado, do Departamento de Geografia
Instituto de Ciências Sociais, da Universidade do Minho



RISCOS

ASSOCIAÇÃO PORTUGUESA
DE RISCOS, PREVENÇÃO
E SEGURANÇA

ESTRUTURAS EDITORIAIS | EDITORIAL STRUCTURES
Estudos Cindínicos

ANTIGOS DIRETORES | FORMER DIRECTORS
Luciano Lourenço

DIRETOR PRINCIPAL | MAIN EDITOR
Fátima Velez de Castro
RISCOS - Associação Portuguesa de Riscos, Prevenção e Segurança

DIRETORES ADJUNTOS | ASSISTANT EDITORS
Adélia Nunes, António Vieira, Bruno Martins, João Luís Fernandes
RISCOS - Associação Portuguesa de Riscos, Prevenção e Segurança

ASSISTENTE EDITORIAL | EDITORIAL ASSISTANT
Fernando Félix
RISCOS - Associação Portuguesa de Riscos, Prevenção e Segurança

COMISSÃO CIENTÍFICA | EDITORIAL BOARD

Adélia Nunes
Universidade de Coimbra

Ana Meira Castro
Instituto Superior de Engenharia do Porto

António Betâmio de Almeida
Instituto Superior Técnico, Lisboa

António Duarte Amaro
Universidade Nova de Lisboa

António Vieira
Universidade do Minho

Bruno Martins
Universidade de Coimbra

Cristina Queirós
Universidade do Porto

Fátima Velez de Castro
Universidade de Coimbra

Helena Fernandez
Universidade do Algarve

Humberto Varum
Universidade de Aveiro

João Luís Fernandes
Universidade de Coimbra

José Simão Antunes do Carmo
Universidade de Coimbra

Luciano Lourenço
Universidade de Coimbra

Romero Bandeira
Inst. de Ciências Biomédicas Abel Salazar, Porto

Tomás de Figueiredo
Instituto Politécnico de Bragança

Antenora Maria da Mata Siqueira
Universidade Federal Fluminense, Brasil

Antonio Carlos Vitte
Universidade Estadual de Campinas, Brasil

Carla Juscélia Oliveira Souza
Universidade de São João del Rei, Brasil

Jorge Olcina Cantos
Universidade de Alicante, Espanha

José Arnaez Vadillo
Universidade de La Rioja, Espanha

Lidia Esther Romero Martín
Universidade Las Palmas de Gran Canaria, Espanha

María Augusta Fernández Moreno
Universidade Católica de Ibarra, Equador

Miguel Castillo Soto
Universidade do Chile

Montserrat Díaz-Raviña
Inst. Inv. Agrobiológicas de Galicia, Espanha

Norma Valencio
Universidade Federal de São Carlos, Brasil

Tiago Ferreira
University of the West of England

Virginia Araceli García Acosta
CIESAS, México

Xavier Ubeda Cartaña
Universidade de Barcelona, Espanha

Yolanda Teresa Hernández Peña
Univ. Distrital Francisco José de Caldas, Colômbia

Yvette Veyret
Universidade de Paris X, França

ANTÓNIO VIEIRA
ADÉLIA NUNES
BRUNO MARTINS
(COORDS.)



RISCO DE MOVIMENTOS EM VERTENTES. APRENDER COM O PASSADO

Edição

RISCOS - Associação Portuguesa de Riscos, Prevenção e Segurança

Email: riscos@riscos.pt

URL: <https://www.riscos.pt/publicacoes/sec/>

OBRA SUJEITA AO PROCESSO DE REVISÃO POR PARES

COORDENAÇÃO EDITORIAL

António Vieira, Adélia Nunes e Bruno Martins

IMAGEM DA CAPA

Karine Nieman

PRÉ-IMPRESSÃO

Fernando Félix

ISSN

2184-5727

DOI (Série)

<https://doi.org/10.34037/978-989-54295-1-6>

ISBN Digital

978-989-9053-30-4

DOI

https://doi.org/10.34037/978-989-9053-30-4_16

SUMÁRIO

PREFÁCIO	7
INTRODUÇÃO	9
PARTE I - MOVIMENTOS EM VERTENTES EM PORTUGAL	15
Perigos geológicos nos Açores: ocorrências mais significativas nos últimos 30 anos e perspectivas futuras Ana Maria Malheiro, Paulo Amaral, Filipe Marques, Letícia Cunha e Francisco Fernandes	17
Desafios e novos instrumentos para monitorização, Prevenção e mitigação de riscos naturais nos Açores Alonso Teixeira Miguel	45
Deteção de percussores de actividade geomorfológica nos taludes da estrada lombinha da maia com recurso a uma estação total André Santos, Paulo Amaral, Ana Maria Malheiro, Filipe Marques e Letícia Cunha	59
Análise do comportamento cinemático do movimento de vertente que afeta a freguesia da Fajázinha, na ilha das Flores Paulo Amaral, André Santos, Ana Maria Malheiro, Filipe Marques e Letícia Cunha	79
Contribuição na interpretação física de um leito fluidizado como risco de movimento de areias. Exemplos de estudos de caso Mário Talaia	97
Riscos geomorfológicos no noroeste de Portugal: da incúria às lacunas no planeamento António Vieira, António Bento-Gonçalves, Jorge Novais, Rui Costa e Júlio Melo	119
PARTE II - MOVIMENTOS EM VERTENTES NO BRASIL	147
Proposta metodológica de regionalização municipal para gerenciamento de riscos decorrentes de escorregamentos – aplicação no município de Guarujá – AP/Brasil Jozzefer Vincov, Edilson Pizzato e Márcio Roberto Magalhães de Andrade	149
Mapeamento de susceptibilidade a deslizamentos no Estado do Rio de Janeiro com base em análise hierárquica de processos Leandro de Souza Camargo, Marcos Paulo Dias da Silva, Rodrigo Werner da Silva, Marcelo Luciano Vieira e Marco Antonio Basques Sobrinho	173

SUMÁRIO

Uso dos mapeamentos de risco nos processos de regularização fundiária no Brasil	
Alessandra Cristina Corsi e Eduardo Soares de Macedo	211
Risk perception among young people living in an area highly susceptible to landslides and flooding: Nova Friburgo, Rio de Janeiro State, SE-Brazil	
Tomás Coelho Netto Duek, Luna Constanza Monteiro Moreno, Lethicia Silva Machado, Leonardo Esteves de Freitas e Ana Luiza Coelho Netto	235
Mapeamento geológico-geotécnico e metodologia para a definição do grau de risco de frentes de lavra	
Jehovah Nogueira Júnior	259

PREFÁCIO

António Vieira

Universidade do Minho, CESC e RISCOS (Portugal)
Instituto de Ciências Sociais, Departamento de Geografia
ORCID: 0000-0001-6807-1153 vieira@geografia.uminho.pt

A publicação do presente volume da série Estudos Cindínicos decorre da realização, no ano de 2022, do **XV Encontro Nacional de Riscos**. Esta edição do evento teve lugar na Região Autónoma dos Açores, mais concretamente na ilha de São Miguel, e teve como tema central o “*Risco de movimentos em vertentes – aprender com o passado*”.

Pretendeu-se com este Encontro, comemorar uma efeméride, evocando a tragédia de Ribeira Quente, ocorrida em 1997, portanto 25 anos antes. Com efeito, a freguesia açoriana de Ribeira Quente, localizada no município de Povoação, foi o palco da destruição e morte, no dia 31 de outubro do referido ano de 1997, na sequência de cheias e movimentos em massa, resultado das condições de elevada e intensa precipitação. Esta catástrofe teve como consequências a perda de vidas humanas, a destruição de habitações e infraestruturas e obstrução de vias, que dificultaram o socorro imediato à população.

O evento decorreu no Auditório da Câmara Municipal da Povoação, na ilha de São Miguel (Açores), nos dias 4 e 5 de novembro de 2022, e contou com a organização da Associação Portuguesa de Riscos, Prevenção e Segurança (RISCOS), em colaboração com o Instituto de Investigação em Vulcanologia e Avaliação de Riscos (IVAR/CIVISA), o Município da Povoação, a Secretaria Regional do Ambiente e Alterações Climáticas - Governo dos Açores (SRAAC), a Faculdade de Letras da Universidade de Coimbra (FLUC), e demais parceiros institucionais.

Ainda que com um carácter regional, condicionado pela localização, o evento contou com elevada adesão de público especializado, oriundo não só das diversas ilhas do arquipélago, mas também da Madeira e de diversas regiões de Portugal continental, tendo contado também com a presença de colegas oriundos vários estados do Brasil. No total, contabilizou-se a presença de quase duas centenas

de participantes inscritos, que resultou também num considerável número de trabalhos propostos para apresentação.

É parte desses trabalhos que reunimos neste livro, conjuntamente com outros contributos versando as mesmas problemáticas, procurando dar sequência aos objetivos a que nos tínhamos proposto com a organização do XV Encontro Nacional de Riscos e que eram os de promover a discussão em torno dos processos naturais responsáveis pela ocorrência dos riscos geomorfológicos, nomeadamente os associados aos movimentos em massa, e dos efeitos que estes causam sobre a sociedade, procurando retirar alguns ensinamentos dos diversos acontecimentos passados nefastos que têm ocorrido.

Boa leitura!

Guimarães, 28 de abril de 2025

INTRODUÇÃO

António Vieira

Universidade do Minho, CESC e RISCOS (Portugal)
Instituto de Ciências Sociais, Departamento de Geografia
ORCID: 0000-0001-6807-1153 vieira@geografia.uminho.pt

A tragédia que se abateu sobre a Ribeira Quente, no município de Povoação, no dia 31 de outubro de 1997, teve como consequências a perda de vidas humanas e destruição de infraestruturas. Condicionada por características geológicas e geomorfológicas favoráveis ao desencadeamento de movimentos em vertentes, a intensa precipitação ocorrida nesse dia (superior a 200 mm; Raposo, 1998) promoveu a ocorrência de inúmeras instabilidades geomorfológicas, responsáveis por todo o cenário de destruição observado. Para além do impacto causado na principal área sinistrada, também se sentiram os efeitos dos inúmeros movimentos ocorridos em diversas vertentes da bacia hidrográfica da Ribeira Quente, impedindo a acessibilidade ao local e a chegada atempada de socorro às vítimas. Este evento não constitui uma situação isolada temporal ou espacialmente. Com efeito, outros episódios catastróficos anteriores, relacionados com inundações ou movimentos em vertentes, se verificaram em Ribeira Quente, bem como noutras localidades da ilha de São Miguel ou outras ilhas do Arquipélago dos Açores (Raposo, 1998). Daí a importância de discutirmos estes eventos catastróficos, de forma inter e pluridisciplinar, procurando entender as suas causas, condicionalismos e consequências, por forma a estarmos melhor preparados e capacitados para gerir de forma mais eficiente futuras ocorrências, procurando sensibilizar as populações e aumentar a sua resiliência.

E este livro constitui, de facto, um instrumento válido para levar a cabo estes objetivos, trazendo contributos extremamente úteis e valiosos para a discussão dos temas propostos no XV Encontro Nacional de Riscos. Com base nos trabalhos apresentados no Encontro e posteriormente submetidos pelos autores, reunimos onze capítulos organizados em duas partes.

Assim, a primeira parte deste livro inclui seis capítulos dedicados à análise de riscos geomorfológicos em território nacional, maioritariamente centrados

no território do arquipélago açoriano. O primeiro capítulo, da autoria de Ana Maria Malheiro, Paulo Amaral, Filipe Marques, Letícia Cunha e Francisco Fernandes, intitulado “*Perigos geológicos nos Açores: ocorrências mais significativas nos últimos 30 anos e perspectivas futuras*”, faz uma breve resenha dos principais riscos de cariz geológico que afetam o Arquipélago dos Açores. Partindo de um enquadramento geológico da região, os autores fazem um périplo ocorrências que consideram mais relevantes e que tiveram lugar durante os séculos XX e XXI, especificamente os relativos às catástrofes resultantes de fenómenos sísmicos, de movimentos de vertente e os relacionados com erosão costeira.

O segundo capítulo, intitulado “*Desafios e novos instrumentos para monitorização, Prevenção e mitigação de riscos naturais nos Açores*”, é da autoria de Alonso Teixeira Miguel e debruça-se sobre as estratégias que têm vindo a ser implementadas na Região Autónoma dos Açores para fazer face às alterações climáticas e aos riscos a elas associados. Assim, é apresentado um conjunto de projetos e investimentos que foram implementados ou estão em implementação, com o objetivo de aumentar a resiliência da Região e dotá-la de ferramentas para prever, monitorizar e mitigar os riscos associados aos movimentos em vertentes e outros, reforçando o planeamento de emergência e a proteção e auxílio às populações.

André Santos, Paulo Amaral, Ana Maria Malheiro, Filipe Marques e Letícia Cunha são os autores do terceiro capítulo, intitulado “*Deteção de percussores de actividade geomorfológica nos taludes da Estrada lombinha da maia com recurso a uma estação total*”. Ao longo deste capítulo são descritas as metodologias empregues na monitorização de taludes intervencionados por obras de estabilização geotécnica, localizados no ramal da Lombinha da Maia (São Miguel), bem como os resultados obtidos. Decorreu desta monitorização a deteção de movimentos num dos taludes monitorizados, tendo sido definidos critérios de alerta e de alarme, que não foram atingidos nas campanhas de monitorização até então realizadas.

O capítulo seguinte, da autoria de Paulo Amaral, André Santos, Ana Maria Malheiro, Filipe Marques e Letícia Cunha, é dedicado à “*Análise do comportamento cinemático do movimento de vertente que afeta a freguesia da Fajãzinha, na ilha das Flores*”. Neste trabalho é analisado um movimento de vertente que afeta uma

parte significativa da freguesia da Fajãzinha, na ilha das Flores. Na sequência do estabelecimento de uma rede de monitorização do processo, são reportados os resultados obtidos e identificados os movimentos existentes durante o período em estudo, testemunhando quatro fases de reativação ocorridos após eventos meteorológicos intensos e consequentes evidências e impactos.

O quinto capítulo, intitulado “*Contribuição na interpretação física de um leito fluidizado como risco de movimento de areias. Exemplos de estudos de caso*”, é da autoria de Mário Talaia, que apresenta resultados de experiências em laboratório que pretendem simular o deslizamento de massas de terra devido a inundações, complementadas com alguns casos observados em território nacional.

O último capítulo da primeira parte é da autoria de António Vieira e António Bento-Gonçalves, e debruça-se sobre o tema “*Movimentos em massa no Noroeste de Portugal: da incúria às lacunas no planeamento*”. Neste texto são apresentados três casos de movimentos em massa ocorridos na região noroeste de Portugal continental e discutidas as implicações relacionadas com a sua ocorrência e o ordenamento do território.

Da segunda parte deste livro fazem parte cinco capítulos, todos eles dedicados a problemáticas relacionadas com os riscos geomorfológicos, mormente os movimentos em vertentes, aplicados em diversas regiões do território brasileiro.

O capítulo seis traz-nos uma “*Proposta metodológica de regionalização municipal para gerenciamento de riscos decorrentes de escorregamentos – aplicação no município de Guarujá – AP/Brasil*” e é da autoria de Jozzefer Vincov, Edilson Pizzato e Márcio Roberto Magalhães de Andrade. Este trabalho apresenta uma proposta de regionalização municipal com o objetivo de aumentar a eficácia da gestão dos riscos de movimentos em vertentes, no município de Guarujá, litoral do Estado de São Paulo. Para este efeito são utilizados dados relativos aos atributos físicos do município, registos de eventos anteriores e dados pluviométricos automáticos. Como resultado primordial, pretende-se com esta metodologia a emissão de alertas individuais para determinadas regiões do município e não para todo o município, como é hoje realizado durante o Plano Preventivo de Defesa Civil (PPDC), procurando reduzir tempos de resposta e aumentar a eficácia do socorro.

O capítulo seguinte, redigido por Leandro de Souza Camargo, Marcos Paulo Dias da Silva, Rodrigo Werner da Silva, Marcelo Luciano Vieira e Marco Antonio Basques Sobrinho, intitula-se “*Mapeamento de susceptibilidade a deslizamentos no Estado do Rio de Janeiro com base em análise hierárquica de processos*” e tem como objetivo a identificação das áreas mais propensas à ocorrência de deslizamentos no Estado do Rio de Janeiro. Para o efeito foi aplicada metodologia de análise multicritério espacial com recurso a Sistemas de Informação Geográfica. A metodologia envolveu a seleção de variáveis de predisposição a deslizamentos, reclassificação e ponderação através do método de Análise Hierárquica (AHP), e construção de modelos de suscetibilidade. Os resultados obtidos demonstraram a eficácia da metodologia aplicada, permitindo a identificação de áreas de risco, contribuindo, desta forma, para a redução do risco de catástrofes no Estado do Rio de Janeiro.

O oitavo capítulo deste livro aborda a temática do “*Uso dos mapeamentos de risco nos processos de regularização fundiária no Brasil*” e é da autoria de Alessandra Cristina Corsi e Eduardo Soares de Macedo. Ao longo deste trabalho é analisado o problema crescente da construção de moradias ilegais em áreas sujeitas a risco de movimentos de vertente e inundações, existente um pouco por todo o território brasileiro, sendo explorada a importância de utilização de cartografia de risco como instrumento de validação das condições de regularização fundiária, de acordo com a lei vigente. São também apresentadas metodologias de avaliação e cartografia de risco, com aplicação a alguns casos de estudo.

O capítulo nove deste livro é dedicado à percepção do risco entre jovens e é da autoria de Tomás Coelho Netto Duek, Luna Constanza Monteiro Moreno, Lethicia Silva Machado, Leonardo Esteves de Freitas e Ana Luiza Coelho Netto. Com o título “*Risk perception among young people living in an area highly susceptible to landslides and flooding: Nova Friburgo, Rio de Janeiro State, SE-Brazil*”, os autores deste trabalho procederam à avaliação da percepção dos riscos de movimentos em vertente e inundações numa área bastante afetada pela catástrofe que em 2011 se abateu sobre o município de Nova Friburgo, no Rio de Janeiro. Esta análise envolveu 69 alunos da escola do bairro de São Geraldo e permitiu a elaboração de um mapa de risco e um mapa de identificação

de emergência comunitária, contribuindo para a sensibilização da população estudantil e aumentar a sua resiliência.

O último capítulo da segunda parte e do livro tem como título o “*Mapeamento geológico-geotécnico e metodologia para a definição do grau de risco de frentes de lavra*” e é da autoria de Jehovah Nogueira Júnior. Neste trabalho o autor propõe uma metodologia para a determinação do grau de risco das frentes de lavra de pedreiras de rochas granitóides situadas em municípios do Estado de São Paulo, Brasil, a partir do mapeamento geológico-geotécnico dos taludes escavados e com o objetivo de recomendar e implementar medidas de prevenção, controle e mitigação.

Esperamos que este livro, que congrega contributos de elevada qualidade, seja de grande utilidade para decisores públicos, investigadores, professores e estudantes, interessados nas questões relacionadas com estes riscos geomorfológicos e com a sua gestão ou que estejam de alguma forma ligados ou sejam responsáveis pela sua análise e gestão. Enfim, esperamos que se concretizem os objetivos do evento que deu origem a esta publicação, retirar alguns ensinamentos dos diversos acontecimentos passados nefastos que têm ocorrido e aplicá-los na gestão dos territórios de risco.

PARTE I:
MOVIMENTOS EM
VERTENTES EM
PORTUGAL

**PERIGOS GEOLÓGICOS NOS AÇORES:
OCORRÊNCIAS MAIS SIGNIFICATIVAS NOS
ÚLTIMOS 30 ANOS E PERSPETIVAS FUTURAS
GEOLOGICAL HAZARDS IN THE AZORES:
MOST SIGNIFICANT OCCURRENCES IN THE LAST
30 YEARS AND FUTURE PROSPECTS**

Ana Maria Malheiro

Laboratório Regional de Engenharia Civil - Açores (Portugal)
ana.mm.malheiro@azores.gov.pt

Paulo Amaral

Laboratório Regional de Engenharia Civil - Açores (Portugal)
paulo.ap.amaral@azores.gov.pt

Filipe Marques

Laboratório Regional de Engenharia Civil - Açores (Portugal)
filipe.mp.marques@azores.gov.pt

Letícia Cunha

Laboratório Regional de Engenharia Civil - Açores (Portugal)
leticia.cm.moniz@azores.gov.pt

Francisco Fernandes

Laboratório Regional de Engenharia Civil - Açores (Portugal)
francisco.s.fernandes@azores.gov.pt

Resumo: Os Açores situam-se numa região tectónica e vulcanicamente ativa.

Devido a este enquadramento, as ilhas encontram-se sujeitas a muitos perigos geológicos, incluindo sismos, deslizamentos de terras e erosão costeira; alguns exemplos de eventos ocorridos são apresentados neste trabalho. Os principais danos resultantes de sismos estavam relacionados com um ou mais dos seguintes fatores: 1) localização de estruturas perto de falhas; 2) solos de fundação instáveis; 3) má qualidade dos materiais e métodos de construção; 4) desrespeito pelos códigos

de construção; e 5) falta de manutenção dos edifícios. Os grandes deslizamentos de terras foram desencadeados por precipitação intensa e /ou de longa duração, induzidos por sismos, ou promovidos pela erosão costeira. A natureza friável e incoerente dos solos vulcânicos e a presença de rochas por vezes bastante fraturadas também contribuiu significativamente para esses processos, fatores por vezes agravados pela ação antrópica. A erosão costeira resulta de circunstâncias naturais e também da atividade humana. Os locais onde ela assume taxas mais elevadas podem constituir um risco para as populações e infraestruturas situadas perto das cristas das arribas. Por fim, apresentam-se algumas medidas com vista à mitigação destes perigos geológicos.

Palavras-chave: Riscos geológicos, sismos, instabilidades geomorfológicas.

Abstract: The Azores are located in a tectonically and volcanically active region. Due to this setting, the islands are subject to many geological hazards, including earthquakes, landslides, and coastal erosion; some examples of relevant occurrences are presented in this paper. The main damage caused by earthquakes was related to one or more of the following factors: 1) location of structures near faults; 2) unstable foundation soils; 3) poor quality of materials and construction methods; 4) disregard for building codes; and 5) lack of building maintenance. Major landslides were triggered by intense and long-term precipitation, or caused by earthquakes or coastal erosion. The friable and incoherent nature of volcanic soils and the presence of sometimes highly fractured rocks also contribute significantly, and these factors are sometimes aggravated by anthropic action. Coastal erosion results from natural circumstances and also from human activity. Places where coastal erosion is severe can pose a risk to people and infrastructure located near cliff crests. Finally, some measures to mitigate these geological hazards are presented.

Keywords: Geological risks, earthquakes, geomorphological instabilities.

Introdução

Os perigos associados aos fenómenos geológicos nas ilhas dos Açores não se limitam aos sismos e erupções vulcânicas. Outros perigos naturais a ter em consideração incluem movimentos de vertente e cheias rápidas, com consequentes elevadas taxas de erosão, comuns em vales e zonas costeiras. Alguns destes perigos estão diretamente relacionados com as condições geológicas e topográficas e são desencadeados por fenómenos naturais, mas alguns são potenciados principalmente pela ação antrópica. Neste documento, foram selecionados alguns casos que envolveram os perigos geológicos mais comuns no arquipélago dos Açores, representando um risco para as pessoas, edifícios, infraestruturas e economia.

Perigos geológicos mais comuns no Arquipélago dos Açores

Sismos

Pomonis *et al.* (1999) estudaram a vulnerabilidade estrutural dos edifícios residenciais aos sismos, nas Furnas, S. Miguel. Neste estudo, constataram que, tal como em todo o arquipélago, os edifícios tradicionais são construídos em alvenaria antiga de pedra não aparelhada, e mesmo a maioria dos edifícios construídos àquela data eram feitos em alvenaria de blocos de betão não reforçado. Como as antigas casas de alvenaria de pedra (muito numerosas no arquipélago) apresentam estruturas pouco resistentes, são as mais vulneráveis aos sismos. Por isso, são necessárias medidas de reforço estrutural para a reabilitação deste tipo de edifícios.

Terceira, 1 de janeiro de 1980

O terramoto de 1 de janeiro de 1980 ocorreu por volta das 15:42 (hora local), com o seu epicentro situado a 38.8° N, 27.7° W. Este sismo foi sentido em todo o arquipélago exceto nas ilhas das Flores e do Corvo (Correia *et al.*, 1992). A magnitude do

sismo atingiu 7,2 na escala de Richter, e durou 28 segundos. O mecanismo focal deste evento sugere que esteve relacionado com um movimento strike-slip esquerdo numa falha subvertical, N150°E (Nunes, 1991, modificado de Hirn *et al.*, 1980) (fig. 1).

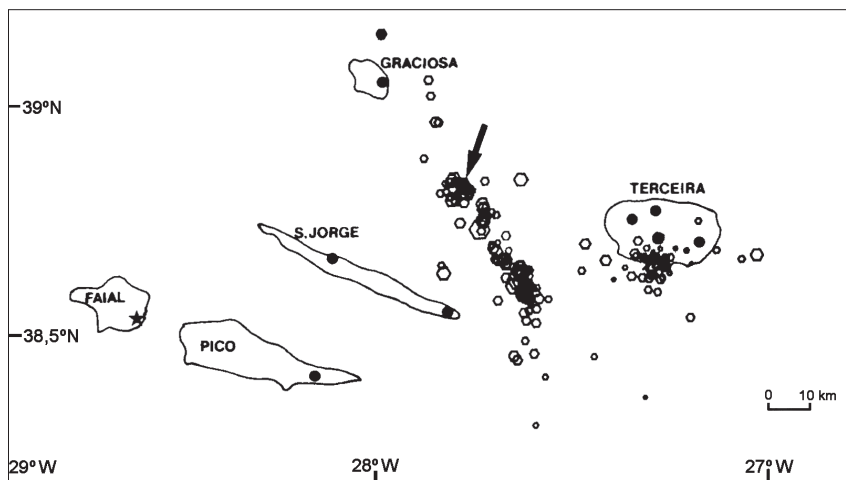


Fig. 1 - Epicentro do sismo de 1 de janeiro de 1980 (seta) e as principais réplicas registadas na rede sísmica (estações permanentes – estrelas; estações temporárias – círculos negros (Fonte: Nunes, 1991, modificado de Hirn *et al.*, 1980).

*Fig. 1 - Epicentre of the 1 January 1980 earthquake (arrow) and the main aftershocks recorded in the seismic network (permanent stations - stars; temporary stations - black circles (Source: Nunes, 1991, modified from Hirn *et al.*, 1980)*

Três ilhas foram fortemente atingidas (Terceira, S. Jorge e Graciosa), tendo a Terceira sido a mais afetada, com danos graves na cidade de Angra do Heroísmo e nas freguesias a oeste da mesma. Casas e monumentos foram severamente atingidos, com mais de 12.000 edifícios afetados. Setenta e três pessoas perderam as suas vidas e dezenas de milhares ficaram sem casa (Oliveira, 1992).

A extensa destruição em Angra do Heroísmo - com cerca de 80% dos edifícios fortemente danificados, muitos dos quais tendo ficado inabitáveis, resultou principalmente do tipo de construção tradicional açoriana. As casas têm normalmente paredes de alvenaria construídas com pedras irregulares (não tijolos), com argila como argamassa, e as estruturas de sustentação do telhado são geralmente construídas com vigas de madeira sem escoramento entre elas e apoiadas diretamente nas paredes, ao

nível da cornija. As forças horizontais produzidas pelo sismo provocaram movimentos que este tipo de construções não conseguiu resistir. . Em geral, construções recentes, se corretamente construídas de acordo com a regulamentação de dimensionamento sísmico atual, comportar-se-iam bem ou de forma satisfatória (Manaças, 1992; Soeiro, 1992).

O sismo de 1 de janeiro de 1980 afetou também antigos muros de contenção feitos em alvenaria de pedra seca, pequenas obras de arte (pontões e aquedutos), e causou graves danos em 5 faróis, nas ilhas Terceira, S. Jorge, Graciosa e Faial.

Faial, 9 de julho de 1998

Às 05:19 (hora local) do dia 9 de julho de 1998, um violento sismo ocorreu e foi sentido em seis das ilhas açorianas, particularmente no Faial. O epicentro situou-se a 16 km NNE da cidade da Horta e teve uma magnitude de 5,8 na escala de Richter (Costa Nunes *et al.*, 1999) (fig. 2).

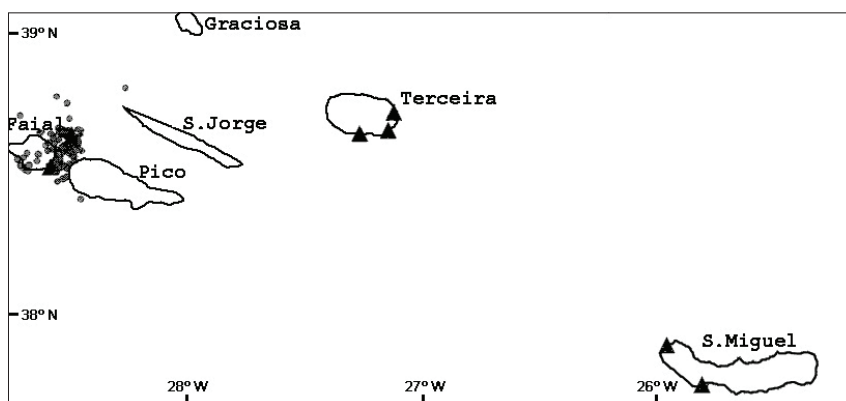


Fig. 2 - Epicentro do sismo de 9 de julho de 1998 (estrela) e as réplicas registadas nas estações da rede sísmica (triângulos) (Fonte: Oliveira e Malheiro, 1999).

Fig. 2 - Epicentre of the 9 July 1998 earthquake (star) and the aftershocks registered in the seismic network stations (triangles) (Source: Oliveira e Malheiro, 1999).

Este evento foi fortemente sentido em toda a ilha do Faial, onde atingiu intensidades máximas na ordem dos VIII/IX graus na Escala de Mercalli



Fot. 1 - Muitas casas sofreram danos devido à má construção e à proximidade a falhas tectónicas (Fotografia de LREC-Açores, tirada em julho 1998).

***Photo 1** - Many houses on Faial suffered damage due to bad construction and proximity to tectonic faults (Photography by LREC-Azores taken in July 1998).*

Na Horta, as casas antigas de alvenaria de 3-4 pisos sofreram danos moderados, e as estruturas modernas de betão armado de baixa altura não sofreram danos ou apenas pequenas fissuras (Lucas *et al.*, 1999). Várias igrejas sofreram danos severos (duas desabaram e duas ficaram gravemente danificadas).

A amplificação de fortes movimentos do solo, possivelmente devido à presença de solos finos (arenosos e siltosos), foi observada principalmente nas freguesias dos Flamengos e Castelo Branco, causando danos extensos (fig. 3 e fot 1).

Para além dos grandes danos causados aos edifícios, o terramoto também deixou o seu impacto em graus variáveis nas estradas: deslizamentos de terras em taludes de escavação e taludes de aterro, colapso de muros de contenção e obras de arte (pontes e aquedutos), bem como fissuras nos pavimentos e colapso de muros laterais. Tais danos, que foram generalizados em toda a ilha, foram mais abundantes e severos nos locais mais próximos do epicentro, ou em falhas geologicamente ativas (Malheiro, *et al.*, 1999).

Os danos causados pelo forte sismo nas estruturas geotécnicas dependeram de vários fatores: 1) movimentos de vertente associados à presença de falhas e à presença de taludes com elevada altura (por exemplo, Ribeirinha e Lomba Grande); 2) amplificação das ondas sísmicas em áreas de espessas camadas de solo (por exemplo, Flamengos e Castelo Branco); e 3) instabilidade superficial com queda de material e compactação de aterros (Oliveira e Malheiro, 1999).

Os movimentos do sismo de 1998, juntamente com a morfologia (zonas instáveis e de elevada inclinação) e as formações geológicas (materiais vulcânicos soltos) da ilha do Faial, geraram inúmeros movimentos de vertente em vários locais. Estas instabilidades geomorfológicas foram localizadas essencialmente ao longo das arribas nas ilhas do Faial e S. Jorge, ao longo de escarpas de falha e nas paredes da Caldeira, ao longo das encostas NW do Vulcão Central (Faial) e em áreas de materiais mais friáveis e/ou descomprimidos.

Um exemplo digno de nota é a escoada detritica descrita por Madeira *et al.*, (1998) que ocorreu no bordo NW da Caldeira. A parte superior desta escoada apresentou uma largura de 200 m e um comprimento de 1400 m. Desenvolveu-se ao longo do vale da Ribeira do Risco, perto da freguesia da Ribeira Funda. Os materiais que constituíam o depósito eram essencialmente piroclastos soltos (pedrapomes de queda e ignimbritos: cinzas, areia e blocos de pedra-pomes). A área afetada cobriu 177.000 m², e o volume de material envolvido foi de pelo menos 600.000 m³. A diferença de altura entre o local onde a escoada começou e o local onde parou foi de 320 m com uma inclinação média de 15°.

Em geral, os deslizamentos ocorridos foram pouco profundos e não envolveram grandes quantidades de material. No entanto, um dos deslizamentos mais significativos ocorreu ao longo da escarpa de falha da Lomba Grande (fig. 5), perto da freguesia de Pedro Miguel. O material desprendeu-se de uma altura de cerca de 200 m e percorreu aproximadamente 208 m (fot. 2).

Esta área é particularmente suscetível a movimentos de vertente devido às suas características morfológicas acentuadas e aos materiais vulcânicos não consolidados que formam a vertente: antigas sequências eruptivas do Complexo Vulcânico da Ribeirinha, incluindo escoadas lávicas alternadas com depósitos piroclásticos, geralmente muito alterados.



Fot. 2 - Deslizamento da Lomba Grande (freguesia de Pedro Miguel)
(Fotografia de LREC-Açores, tirada em julho de 1998).

Photo 2 - *Lomba Grande landslide (Pedro Miguel parish)*
(Photography by LREC-Azores taken in July 1998).

Este sismo evidenciou como certos tipos de formações vulcânicas se comportam de forma instável e causam grandes movimentos de vertente que estão diretamente relacionados com a intensidade da ação sísmica atuante (acelerações > 0,5 g). Não surpreendentemente, perto de falhas geológicas, observou-se que o grau de danos era maior.

A maioria dos danos documentados após estes dois sismos resultou da proximidade a estruturas tectónicas, do tipo de solo de fundação, da má qualidade da construção e dos materiais de construção, da ausência de projeto ou da aplicação dos regulamentos de dimensionamento sísmico, e da falta de manutenção dos edifícios.

Os sismos de 1980 e 1998 tiveram, no entanto, alguns efeitos positivos em vários aspetos: 1) melhoria da qualidade de construção; 2) aumento do nível de manutenção dos edifícios; e 3) um aumento qualitativo notável da qualidade de vida. Os edifícios pós-sismos melhoraram substancialmente, tanto em qualidade como em quantidade, empregando técnicas de construção inovadoras, particularmente para os grandes edifícios.

Movimentos de vertente

No passado recente, os movimentos de vertente foram responsáveis por catástrofes naturais de dimensões consideráveis nas ilhas dos Açores. As suas ocorrências podem ser desencadeadas por períodos de precipitação intensa e/ou

prolongada, muitas vezes também agravadas pela atividade humana no ecossistema: alterações na rede de drenagem, encaminhação de águas pluviais incorretos, alterações na ocupação do solo (*e.g.* eliminação da cobertura vegetal), criação de taludes de escavação muito inclinados, etc.

Todos os anos, e principalmente durante a estação chuvosa, são relatados centenas de movimentos de vertente em todo o arquipélago. Embora a maioria destes sejam eventos relativamente pequenos, podem, no entanto, ser altamente destrutivos. A precipitação intensa e/ou prolongada registada antes ou durante o fenómeno parece ser o fator primordial para o início dos movimentos de vertente em ambientes geológicos característicos dos Açores. Valadão (2002) estimou para o concelho de Povoação, ilha de S. Miguel, que quando a quantidade de precipitação excede 200 l/m^2 , é expectável a ocorrência de deslizamentos/escoadas detriticas. Marques *et al.* (2010), dando continuidade ao trabalho desenvolvido por Marques *et al.* (2008), desenvolveram um sistema empírico de alerta para movimentos de vertente através da aplicação da Distribuição Generalizada dos valores Extremos na determinação de limiares de precipitação para o concelho da Povoação, ilha de São Miguel. A ocorrência de movimentos de vertente no concelho da Povoação é regida pela função $I(D)=132,06 D^{-0,558}$ ($R^2=0,94$), correspondendo $BFI(D)=65,34 D^{-0,4813}$ à envolvente de discriminação entre episódios de instabilidade geomorfológica e dias em que não se registou instabilidade.

Amaral (2010), num estudo em taludes da Povoação, refere que a maioria dos movimentos de vertente despoletados pela precipitação depende em muito do conteúdo hídrico dos solos, pois em geral estas instabilidades decorrem da redução dos parâmetros de resistência ao corte, nomeadamente, da coesão aparente, que tende a anular-se à medida que o solo atinge a sua saturação. Assim, é necessária a instalação de estações meteorológicas, de preferência automáticas, tensiómetros para avaliação do conteúdo hídrico dos solos, bem como a análise do comportamento do solo e das formações geológicas que constituem o talude (Gaspar *et al.*, 1997). Os solos vulcânicos, compostos principalmente por cinzas e outros materiais piroclásticos, apresentam uma elevada suscetibilidade aos movimentos de vertente deste tipo.

A entrada de água adicional - de origem pluvial ou causada pela ação humana - no sistema hidrológico irá saturar, reduzindo assim a coesão aparente e aumentando a pressão da água no interior do solo (Ruiz e Gijón, 1994).

Por outro lado, as fraturas podem aumentar a permeabilidade e, consequentemente, a rápida taxa de infiltração da água da chuva, promovendo uma maior circulação da água subterrânea, o que por sua vez contribui para criar condições de instabilidade geomorfológica (Wasowski *et al.*, 2000).

A inclinação do talude é um dos fatores que influenciam a ocorrência de movimentos de vertente. Por conseguinte, verifica-se que os taludes com declives mais elevados são os mais suscetíveis à instabilidade. O tipo de uso do solo e a vegetação presente são também fatores importantes. As áreas completamente desprovidas de vegetação são mais propensas à erosão. Por outro lado, a densidade e profundidade das raízes aumentam a resistência ao corte de uma potencial superfície de deslizamento (Greenway, 1992, em: Turrini e Visintainer, 1998). Durante os períodos de pluviosidade acompanhados por ventos fortes (muito frequentes nos Açores), alguns tipos de árvores com raízes superficiais, tais como a *cryptomeria japonica*, uma árvore comum nestas ilhas, podem ser desenraizadas; tal desenraizamento pode contribuir para o desencadeamento de superfícies de rotura. Estes movimentos de vertente ocorrem geralmente nos flancos dos vulcões centrais, nas paredes das caldeiras, nos vales das linhas de água e ao longo das escarpas de falhas e das arribas litorais.

Outros fatores podem também contribuir para desencadear movimentos de vertente, tais como sismos (como referido anteriormente) e atividade vulcânica. Por exemplo, associado à erupção do vulcão das Furnas em 1630, ocorreram vários deslizamentos, um deles de grandes proporções na atual freguesia da Ribeira Quente, que felizmente na altura não era permanentemente habitada (Cole *et al.*, 1995; Jerônimo, 1989, em: Guest *et al.*, 1999).

Há uma série de relatos históricos de movimentos de vertente fatais nas ilhas, associados a grandes sismos. Um exemplo é o violento sismo que ocorreu em 1522, e provocou uma grande escoada detritica que atingiu Vila Franca do Campo (grau X na Escala de Intensidade de Mercalli modificada). A maioria dos edifícios na área ficaram soterrados, e cerca de 5000 pessoas morreram, assim como muitos animais. Este evento interrompeu estradas e também destruiu terrenos agrícolas (Machado, 1966; Nunes, *et al.*, 2001). Em 1757, outro sismo, considerado o maior do arquipélago (Magnitude estimada $M=7,4$), foi responsável por 1034 mortes na

ilha de S. Jorge, 11 na ilha do Pico e 1 na ilha Terceira. Uma das consequências deste grande terramoto foi o desencadeamento de enormes movimentos de vertente, que criaram novas "fajãs" (termo açoriano para pequenas plataformas bordejadas por falésias, perto do mar) ou aumentaram a dimensão de outras. Estes movimentos de vertente relacionados com o sismo provocaram uma vasta destruição nas zonas costeiras, especialmente nas Fajãs dos Vimes, S. João e Cubres (Nunes *et al.*, 2001).

Ponta da Fajá, ilha das Flores 1987

Na madrugada de 18 de dezembro de 1987, vários movimentos de vertente tiveram lugar num talude íngreme sobranceiro ao lugar da Ponta da Fajá, ilha das Flores (fot. 3).

Este talude de 500 m de altura consiste principalmente em alternâncias de escoadas de lava basáltica com níveis de materiais piroclásticos. O material mobilizado espalhou-se em forma de leque, envolvendo cerca de 150.000 m³. O movimento de vertente soterrou uma rua e dois edifícios, nomeadamente uma capela e uma casa de veraneio; também destruiu um automóvel e cobriu uma grande área de terra agrícola com lama. Após este evento, a zona foi interditada para habitação, contudo, recentemente (em 2022) essa interdição foi levantada por pressão dos habitantes da ilha.



Fot. 3 - Vista geral do movimento de vertente que afetou a Ponta da Fajá (Flores) em dezembro de 1987 (Fotografia de LREC-Açores, tirada em janeiro de 1988).

Photo 3 - General view of the landslide that affected Ponta da Fajá (Flores) in December 1987 (Photography by LREC-Azores taken in January 1988).

Ribeira Quente, ilha de S. Miguel, 1997

A 31 de Outubro de 1997, centenas de instabilidades geomorfológicas ocorreram na ilha de S. Miguel, principalmente nas Furnas, Ribeira Quente e Povoação, na sequência de condições meteorológicas muito adversas (pluviosidade de 220 l/m²). Os fatores que contribuíram para estes movimentos de vertente incluíram: 1) fortes ventos de SE que acompanharam a intensa pluviosidade; 2) a natureza não consolidada dos solos vulcânicos; e 3) a saturação do solo devido à precipitação prolongada ocorrida nos dias anteriores (Gaspar e Guest, 1998).

As instabilidades foram essencialmente escoadas detriticas, muito fluidas, constituídas por uma mistura de água, pedra-pomes, cinzas, sistemas radiculares, e ainda troncos e ramos de árvores. Alguns fluxos detriticos incluíam grandes blocos de rochas, alguns dos quais com diâmetros máximos superiores a 3 m. Na maioria dos casos, as profundidades da superfície de rotura foram relativamente pequenas (< 1 m). No entanto, em alguns casos essa profundidade alcançou vários metros. Embora houvesse algumas exceções, a maioria dos movimentos de vertente tiveram origem em taludes com elevada inclinação, geralmente superior a 45°. Apesar das suas espessuras serem pequenas, muitas eram bastante extensas (até 430-450 m). Os movimentos de vertente mais comuns tinham volumes entre centenas a milhares de metros cúbicos, espessuras que variavam de < 1 m a vários metros, larguras de dezenas de metros e comprimentos que variavam entre dezenas a algumas centenas de metros. Os maiores tinham volumes muito superiores (Gaspar *et al.*, 1997).

Várias casas e pontes foram parcial ou totalmente destruídas, a rede rodoviária foi fortemente danificada ou mesmo interrompida (fot. 4); os sistemas de comunicações, transporte e fornecimento de energia foram afetados e muitos terrenos agrícolas foram cobertos por lama.

Um destes deslizamentos destruiu 36 casas e matou 29 pessoas na freguesia da Ribeira Quente (fot. 5). Além disso, 3 pessoas ficaram feridas e 114 sem casa. A freguesia ficou isolada durante mais de 12 horas.

Os exemplos acima ilustram as perdas de vidas e económicas substanciais resultantes dos movimentos de vertente. O alcance e a dimensão do perigo das instabilidades geomorfológicas mostram que estes não podem ser ignorados no



Fot. 4 - A estrada entre Furnas e Povoação foi interrompida devido a um deslizamento.
(Fotografia de LREC-Açores, tirada a 31-10-1997).

Photo 4 - The road between Furnas and Povoação was destroyed by a large landslide
(Photography by LREC-Azores taken on 31-10-1997).



Fot. 5 - Aspeto de uma escoada detrítica que afetou inúmeras casas na Ribeira Quente durante o evento de 31 de outubro de 1997 (Fotografia de LREC-Açores, tirada a 31-10-1997).

Photo 5 - View of a debris flow that affected many houses during the event of 31 October 1997
(Photography by LREC-Azores taken on 31-10-1997).

planeamento de um desenvolvimento urbano sustentável e integrado. A perda de vidas humanas na Ribeira Quente, juntamente com a destruição de edifícios e outras infraestruturas básicas em vários locais do concelho da Povoação, reflete a vulnerabilidade dessa área, mesmo no que diz respeito a fenómenos naturais de magnitude relativamente pequena.

Fajã dos Cubres, ilha de S. Jorge, 2003

Na madrugada de 23 de abril de 2003, no topo de uma arriba na costa norte da ilha de S. Jorge (fig. 4), ocorreu um grande movimento de vertente (envolvendo um volume aproximado de 12.500 m³).

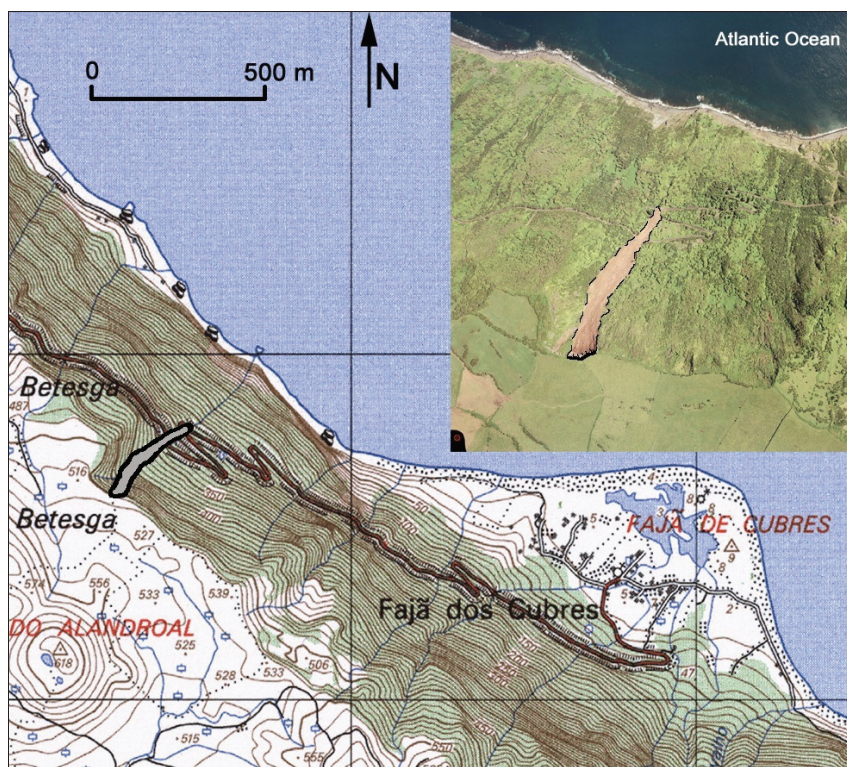


Fig. 4 - Localização da instabilidade geomorfológica – Costa norte da ilha de S. Jorge.

Fig. 4 - Location of the geomorphological instability – North coast of S. Jorge Island.

Esta instabilidade geomorfológica envolveu a queda de blocos basálticos misturados com solos saturados. Alguns desses blocos apresentavam cerca de 2 m de diâmetro máximo. Formou uma cicatriz de 50-60 m na crista da arriba, com um comprimento de cerca de 350 m. Na sua queda, os blocos basálticos arrastaram consigo parte do material piroclástico subjacente. Como resultado, 3 troços da estrada que dá acesso à Fajã dos Cubres foram obstruídos (fot. 6), isolando essa Fajã.

A área afetada faz parte de uma arriba localizada a sul da estrada que dá acesso à Fajã dos Cubres. Corresponde a uma vertente com uma inclinação subvertical e cuja altura é de cerca de 516 m. Não foi possível observar diretamente a maior parte da vertente, por estar coberta de vegetação ou material mobilizado. No entanto, pelo que foi possível observar, a zona afetada é constituída por alternâncias de escoadas lávicas de natureza basáltica, relativamente pouco espessas, com clinker (fragmentos de blocos e cascalhos com geometrias irregulares, formados a partir de lava consolidada) e materiais piroclásticos. As escoadas basálticas apresentam-se bastante fraturadas.



Fot. 6 - O colapso de blocos basálticos de grandes dimensões (muitos > 1 m) e solos levou ao corte da estrada de acesso à Fajã dos Cubres
(Fotografia de LREC-Açores, tirada em abril de 2003).

***Photo 6** - The collapse of large basaltic blocks (many > 1 m) and soil block the road access to Fajã
(Photography by LREC-Azores taken in April 2003).*

Foram observadas várias fraturas perto da crista do talude afetado, uma delas, a W da cicatriz, com cerca de 20 m de afastamento da crista e aproximadamente 120 m de comprimento. Estas fraturas correspondem a superfícies de rotura já formadas que levarão a futuros movimentos de vertente. Também foram identificadas grandes fraturas a uma distância de cerca de 70 metros para sul da crista do talude. De acordo com as informações dos agricultores locais, algumas destas fraturas têm profundidades de cerca de 30 metros. Estas fraturas estavam alinhadas numa direção paralela à crista do talude (W-E), refletindo provavelmente a influência de estrutura tectónicas.

Erosão costeira

A erosão costeira tem sido objeto de grande preocupação ao longo dos anos devido aos danos significativos que tem causado às pessoas que vivem nas zonas costeiras. Este problema é particularmente grave nos Açores, porque as ilhas constituem um sistema natural em delicado equilíbrio com o mar circundante. Neste contexto, é fundamental um bom conhecimento dos processos dinâmicos relacionados com a orla costeira e uma avaliação das suas condições de estabilidade. Esta questão torna-se ainda mais pertinente devido ao facto de a própria ocupação humana na orla costeira contribuir frequentemente para a intensificação dos processos de erosão costeira (Borges *et al.*, 2001).

Em algumas partes da orla costeira das ilhas açorianas, as elevadas taxas de erosão levam a situações de risco para as populações que aí vivem. Assim, é fundamental identificar o risco de zonas costeiras perigosas, para que seja possível definir critérios prudentes de utilização do solo ao planear a ocupação e desenvolvimento sustentável da orla costeira.

A erosão costeira no arquipélago dos Açores resulta de um ou mais dos seguintes fatores:

- a) Fatores geológicos: em geral, as formações geológicas das ilhas (exceto a ilha de Santa Maria) são relativamente recentes e, por conseguinte, o equilíbrio geológico está longe de ser alcançado. As falésias consistem, geralmente, em alternâncias de materiais geológicos com diferentes resistências, tornando-as

assim potencialmente instáveis. As diferenças entre o comportamento das camadas mais brandas e/ou incoerentes, facilmente erodíveis, e as camadas mais competentes, resistentes à erosão, juntamente com o sistema de desgaste e fratura das formações geológicas que constituem a arriba, afetam grandemente a sua estabilidade (Pereira, 1997; Alcobia e Bettencourt, 2001). A combinação de todas estas características dos maciços com a ação dos agentes erosivos é responsável pela instabilidade de materiais que se encontravam em delicado equilíbrio limite;

- b) Fatores morfológicos: a instabilidade dos maciços depende fortemente da altura e da inclinação do talude. Além disso, se as formações geológicas forem muito fraturadas, serão ainda mais propensas ao colapso;
- c) Fatores erosivos: a ação do mar desempenha um papel fundamental no recuo da linha de costa. A remoção da blindagem (blocos e calhaus rochosos) da base das arribas pelo impacto contínuo das ondas leva à instabilidade da face exposta, contribuindo para a remoção de materiais mal consolidados. A circulação da água que afeta o interior dos maciços contribui para a erosão diferencial dos estratos. O escoamento de água superficial (particularmente nos sectores onde a densidade da fraturação é mais elevada e as rochas mais alteradas) pode também ter um papel importante na aceleração da erosão costeira (Pereira, 1997; Alcobia e Bettencourt, 2001);
- d) Fatores humanos: a rápida e intensa ocupação humana da orla costeira acelera grandemente os processos erosivos. O escoamento de água direcionado para as falésias é um importante fator de instabilidade, especialmente em áreas onde a densidade da fraturação é elevada. Além disso, a extração de areia do fundo marinho, bem como das dunas e praias, em particular na costa norte da ilha de São Miguel, perturbou, em tempos, o equilíbrio sedimentar ao longo da costa, modificando assim a intensidade da erosão costeira (Borges, 1995).

É de salientar que as taxas de recuo da linha de costa não são estáveis nem contínuas ao longo do tempo. Para S. Miguel, a taxa média de recuo estimada é de 0,27 m/ano, mas pode atingir, em alguns casos, taxas mais elevadas como 1,2 m/ano (Borges, 1995). Foi demonstrado que o recuo das falésias é favorecido ao longo das costas com formas côncavas, e de menor expressão nas costas com formas convexas (Borges, 1995).

Costa norte da ilha de S. Miguel

Para um grande setor da costa norte de S. Miguel, incluindo as freguesias de Rabo de Peixe, Calhetas e Fenais da Luz, tem-se verificado ao longo dos anos que os desabamentos constituem o maior contributo de erosão costeira, colocando em risco as habitações no topo das arribas. Na maioria das situações, nestes locais as falésias têm alturas médias da ordem dos 20-30 m e são constituídas na parte superior por escoadas lávicas de natureza basáltica, por vezes bastante fraturadas, com intercalações de níveis de clinker. Na parte inferior destas arribas, é frequente observar-se a presença de níveis de piroclastos traquíticos (cinzas e *lapilli*). Por conseguinte, devido às diferentes litologias - com diferentes graus de erodibilidade - essas arribas estão muito suscetíveis à erosão costeira, particularmente devido aos materiais menos resistentes que se encontram na sua base. Também podem ocorrer quedas de blocos rochosos, pondo em risco os quintais e algumas casas situadas próximo à crista das arribas (fot. 7). Esta erosão costeira é agravada pela presença de tubos de descarga que drenam diretamente sobre a superfície da falésia.



Fot 7 - Colapso quase total de um logradouro devido à erosão costeira, nas Calhetas (S. Miguel) (Fotografia de LREC-Açores, tirada em 2000).

Phorto 7 - *Almost total collapse of a back yard due to coastal erosion, in Calhetas (S. Miguel) (Photography by LREC-Azores taken on 2000).*

Rocha dos Campos, ilha de S. Miguel

Esta localidade situa-se na costa sul, na zona central da ilha de S. Miguel, associada ao Complexo Vulcânico do Fogo. Neste setor, a arriba é constituída por intercalações de piroclastos de natureza traquítica, quer de queda quer de fluxo, que se sobrepõem a escoadas lávicas de natureza basáltica (Borges *et al.*, 1997). A falésia tem 50 a 70 m de altura, atingindo pontualmente um máximo de 80 m. Ao longo da base da falésia observam-se acumulações localizadas de depósitos de material mobilizados por instabilidades que vão acontecendo ao longo do tempo. Estes depósitos de materiais servem como proteção natural contra a ação erosiva das ondas, particularmente no setor do NW-SE. Perto do centro desta zona, existe uma praia (Praia do Arruda). O recuo costeiro na Rocha dos Campos provocou a destruição parcial da estrada pública existente próximo à crista da arriba, e desde 1988, o colapso de casas existentes a norte dessa via (fot. 8).



Fot. 8 - Várias casas e uma rua foram destruídas pela erosão costeira na Rocha dos Campos (Vila Franca do Campo, S. Miguel) (Fotografia de LREC-Açores, tirada em abril de 1992).

Photo 8 - Several houses and a street were destroyed by coastal erosion in Rocha dos Campos (Vila Franca do Campo, S. Miguel) (Photography by LREC-Azores taken in April 1992).

Borges (2003), baseado em medições de campo e suportado por fotos aéreas, determinou o valor de 0,14 m/ano para a taxa média de recuo a longo prazo para esta zona, considerando para análise o período de 1955-1988; contudo, durante o período 1988-1996, a taxa de recuo desta linha costeira foi, em média, de 3 m (0,37 m/ano).

Os principais fatores que contribuíram para a erosão costeira nesta zona foram:

- O constante escoamento de água sobre a face da arriba, como resultado da ocupação humana;
- A falta de um sistema de drenagem eficiente;
- A natureza não consolidada do material que compõe a falésia (formações soltas, permeáveis e facilmente erodíveis);
- A elevada inclinação da arriba;
- A existência de muitas fissuras/fraturas, frequentemente ampliadas pela drenagem superficial das águas;
- Os agentes climáticos (chuva, vento), especialmente durante as tempestades.

Costa sul, ilha do Faial

Esta zona é formada principalmente por escoadas lávicas de reduzida espessura, fragmentadas, com intercalações de clinker, que são facilmente erodidas pela ação biológica, das ondas e do vento. Consequentemente, formam-se várias grutas, algumas de grande dimensão (com pelo menos 10 m de profundidade), que se estendem sob a estrada que liga a cidade da Horta ao aeroporto (fot. 9).



Fot. 9 - Algumas das inúmeras grutas existentes na arriba da costa sul do Faial (Fotografia de LREC-Açores, tirada em outubro de 2020).

Photo 9 - Some of some of by LREC-Azores taken in October 2020).

S. Miguel Arcanjo, ilha do Pico

Em junho de 2014 ocorreu um desabamento de rocha na arriba litoral no lugar de São Miguel Arcanjo, concelho de São Roque (ilha do Pico) tendo afetado um caminho municipal, o sistema de abastecimento de água e de eletricidade e originado o realojamento de 31 pessoas (9 moradias). O desabamento ocorreu numa arriba, cuja constituição geológica consiste numa alternância de escoadas lávicas com níveis de clinker. Este evento ocorreu em 4 fases distintas: a primeira em setembro de 2013, a segunda e terceira no dia 13 de junho de 2014 e a última no dia 16 junho de 2014 (fot. 10 e fig. 5). O processo culminou com a rotura global de um segmento considerável da arriba, com cerca de 100 de altura e 240-250 m de largura entre flancos, tendo provocado um recuo da crista para o interior de, aproximadamente, 30 m



Fot. 10 - Vista geral da cicatriz no final do processo de instabilização
(Fotografia de Diogo Caetano, tirada a 09 de julho de 2014).

Photo 10 - General view of the scar at the end of the instability process
(Photography taken by Diogo Caetano on 9th of July 2014).

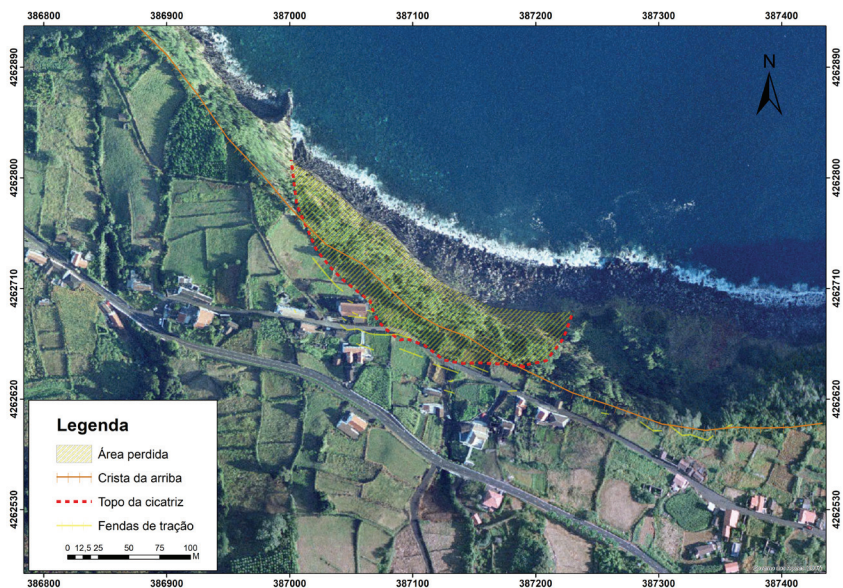


Fig. 5 - Identificação da área perdida e das fendas de tração no terreno (foto aérea da zona antes dos desabamentos).

Fig. 5 - Identification of the lost area and the traction cracks in the terrain (aerial photo of the area before the landslides).

Considerações finais

Os exemplos atrás apresentados demonstram vários tipos de danos causados pelos processos geológicos que mais frequentemente afetam as ilhas dos Açores: sismos, movimentos de vertente e erosão costeira. Esses danos incluem a perda de vidas humanas, destruição de sistemas rodoviários rurais, municipais e regionais, inundações, destruição de edifícios, redes e infraestruturas, perda de gado, danos agrícolas, etc.

Na maioria dos casos, os principais fatores que contribuíram para o risco destes perigos incluem: taludes com elevadas inclinações; saturação hidráulica (fatores meteorológicos e hidrológicos); instabilidade geológica inerente (dependendo das formações vulcânicas envolvidas); atividades humanas (ocupação desadequada de terrenos, desflorestação descontrolada, alteração causada pelo homem e/ou

obstrução das drenagens naturais, existência de construções em leitos de cheia de linhas de água e próximo ao topo ou à base de taludes instáveis, vias coincidentes com linhas de água, pontes ou aquedutos que não foram bem localizados ou concebidos e sistemas deficientes de drenagem rodoviária) (Malheiro, 1998).

Tendo em conta todos os fatores acima enumerados, é fundamental a implementação de algumas medidas com vista a minimizar os riscos decorrentes destes perigos:

- Preparação de mapas de perigos e riscos (as autoridades devem estar conscientes da importância da avaliação dos perigos e da vulnerabilidade para assegurar o desenvolvimento socioeconómico normal destas ilhas);
- Planeamento urbano eficiente, tendo em conta os múltiplos perigos geológicos que podem ocorrer;
- Desenvolvimento de códigos de construção melhorados para garantir a qualidade e a segurança;
- Proteção do ambiente;
- Manutenção permanente das construções e infraestruturas;
- Estabilização de taludes com vegetação adequada. As áreas sem qualquer tipo de vegetação são consideradas mais vulneráveis à erosão; no entanto, algumas espécies de vegetação, por ex., vegetação de médio e grande porte com raízes superficiais, podem ser arrancadas dando origem a deslizamentos, razão pela qual devem ser evitadas;
- Desenvolvimento de programas que informem as populações sobre os perigos geológicos da área, as medidas preventivas que podem levar à minimização do risco e os procedimentos que devem ser adotados em situações de emergência.
- Implementação de sistemas de monitorização (dependendo das situações), que permitam acompanhar a evolução do processo de instabilidade, de modo a alertar atempadamente a população da zona afetada.

No que respeita aos sismos, os dois exemplos descritos neste trabalho demonstraram a necessidade de reforçar, de forma sistemática, as estruturas antigas de modo a resistirem às ações previstas nos atuais regulamentos de dimensionamento sísmico, bem como bem como um planeamento rigoroso para prevenir a construção

de edifícios em áreas de elevado risco. No que diz respeito a potenciais movimentos de vertente desencadeados por futuros sismos, é importante determinar com antecedência:

- a) as situações críticas;
- b) a altura da queda;
- c) a distância de propagação dos detritos;
- d) o tipo de rochas envolvidas e o seu estado de alteração e competência;
- e) e a inclinação do talude.

Outros parâmetros tais como o grau de saturação do solo, a presença de vegetação, o grau de compacidade, etc., são também importantes para a caracterização de potenciais movimentos de vertente que podem ser desencadeados por futuros sismos. O problema da ação sísmica associada a terrenos não consolidados também deve ser tido em conta.

Bibliografia

- Alcobia, S. & Bettencourt, P. (2001). Evolução do litoral em arriba; avaliação de risco e soluções de estabilização. *I Congresso sobre Planeamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa. Problemas atuais e Perspetivas Futuras*. Inst. da Água, A.P.R.R., Sec. Reg.do Ambiente (Eds.), Ponta Delgada, Portugal, 12 p (cd).
- Amaral, P. (2010). *Caracterização geotécnica e hidrológica de depósitos vulcânicos: Modelação da estabilidade de taludes no concelho da Povoação (ilha de S. Miguel – Açores) (Tese de Doutoramento)*. Departamento de Geociências da Universidade dos Açores, 277 p.
- Borges, P. (1995). *Contribuição para o conhecimento geológico do litoral sul de S. Miguel (Açores) (Provas de Aptidão Pedagógica e Científica)*. Departamento de Geociências da Universidade dos Açores, 168 p.
- Borges, P. (2003). *Ambientes litorais nos Grupos Central e Oriental do arquipélago dos Açores. Conteúdos e Dinâmica de Microescala (Açores) (Tese de doutoramento)*. Departamento de Geociências da Universidade dos Açores, 451 p.
- Borges, P., Virgílio Cruz, J. V. & Andrade, C. (1997). O recuo da arriba litoral no local da Rocha dos Campos (Água d'Alto, S. Miguel) – Um estudo de caso. *Açoreana*, 8 (3), 391-401.
- Borges, P., Andrade, C., Cruz, J. V. & Marques, F. M. (2001). Erosão costeira em S. Miguel (Açores) – Os exemplos da Rocha Quebrada e da Rocha dos Campos. *I Congresso sobre Planeamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa. Problemas atuais e Perspetivas Futuras*. Inst. da Água, A.P.R.R., Sec. Reg.do Ambiente (Eds.), Ponta Delgada, Portugal, 10 p (cd).
- Correia, M. J., Reis, P., Nunes, J. C. & Moreira, V.S. (1992). A sismicidade histórica dos Açores e o sismo de 1 de janeiro de 1980. Monografia “10 anos após o sismo dos Açores de 1 de janeiro de 1980”, vol 1. Oliveira, C.S., Lucas, A. & Guedes, J., Laboratório Nacional de Engenharia Civil (Eds.), Lisboa, 127-133.

- Costa Nunes, J., Costa, P. T. & Senos, M. L. (1999). Estudos de sismicidade no Arquipélago dos Açores – Aplicação ao sismo de 9 de julho de 1998. 4º Encontro Nacional sobre Sismologia e Engenharia Sísmica. Martins, C.A.P. (Ed.), Faro, Portugal, 19-28.
- Gaspar, J. L., Wallenstein, N., Coutinho, R., Ferreira, T., Queirós, G., Pacheco, J., Guest, J., Tryggvason, E. & Malheiro, A. (1997). Considerações sobre a ocorrência dos movimentos de massa registados na madrugada de 31 de outubro de 1997 na ilha de S. Miguel, Açores. *Relatório Técnico 14/DGUA/97*, Univ. Açores, Portugal, 28 p.
- Gaspar, J. L. & Guest, J. (1998). The 31st October 1997 landslides at S. Miguel Island, Azores: a dramatic lesson for the future. *Proceedings of "Volcanic Hazard Assessment, Monitoring and Risk Mitigation" (EC 1998 Advanced Study Course)*. Centro de Vulcanologia, Univ. Açores (Eds.), S. Miguel, Portugal, 43.
- Guest, J., Gaspar, J.L., Cole, P.D., Queiroz, G., Duncan, A., Wallenstein, N., Ferreira, T. & Pacheco, J. (1999). Volcanic geology of Furnas volcano, São Miguel, Azores. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 92 (1-2), 1-29.
- Hirn, A., Haessler, H., Hoang Trong, P., Wittlinger, G. & Mendes Victor, L. (1980). Aftershock sequence of the January 1st, 1980, earthquake and present-day tectonics in the Azores. *Geophysical Research Letters* 7 (7), 501-504.
- Lucas, A., Oliveira, C. S. & Frago, M. R. (1999). Sismo de 9 de julho de 1998 nas ilhas do Faial, Pico e S. Jorge. Quantificação dos danos observados no parque habitacional. Uma primeira análise. 4º Encontro Nacional sobre Sismologia e Engenharia Sísmica. Martins, C.A.P. (Ed.), Faro, Portugal, 707- 716.
- Machado, F. (1966). Anomalias das intensidades dos terremotos de S. Miguel (Açores) em 1522. *Boletim do Museu e Lab. Min. e Geol. da Fac. Ciências de Lisboa*, 10 (2), 109-117.
- Madeira, J., Silveira, A. & Serralheiro, A. (1998). A tectónica do Faial e o sismo de 9 de julho de 1998. 1º Simpósio de Meteorologia e Geofísica da APMG. A.P.M.G. (Eds.), Lagos, Portugal, 81-88.
- Malheiro, A. (1998). Volcanic Terrain instability and Human Vulnerability at Povoação County (S. Miguel, Azores) – *Proceedings of "Volcanic Hazard Assessment, Monitoring and Risk Mitigation (EC 1998 Advanced Study Course)*. Centro de Vulcanologia, Univ. Açores (Eds.), S. Miguel, Portugal, 82.
- Malheiro, A., Fraga, C. & Oliveira, C. S. (1999). Escorregamentos e danos nas vias de comunicação causados pelo sismo de 9 de julho de 1998 no Faial – Pico – S. Jorge. 4º Encontro Nacional sobre Sismologia e Engenharia Sísmica. Martins, C.A.P. (Ed.), Faro, Portugal, 27-36.
- Mananças, E. (1992). Sismo de 1 de janeiro de 1980 visto 43 horas após. Notas e comentários. Monografia "10 anos após o sismo dos Açores de 1 de janeiro de 1980", vol 1. Oliveira, C.S., Lucas, A. & Guedes, J., Laboratório Nacional de Engenharia Civil (Eds.), Lisboa, 223-230.
- Marques, R., Zêzere, J., Trigo, R., Gaspar, J.L. & Trigo, I. (2008). Rainfall patterns and critical values associated with landslides in Povoação County (São Miguel Island, Azores): relationships with the North Atlantic Oscillation. *Hydrol. Process.*, 22: 478-494. DOI: <https://doi.org/10.1002/hyp.6879>
- Marques, R., Zêzere, J., Amaral, P., Gaspar, J.L & Queiroz, G. (2010). Desenvolvimento de um Sistema Empírico de Alerta para Movimentos de Vertente (ELEWS-Pov) através da aplicação da Distribuição Generalizada dos Valores Extremos (dGVE) na determinação de limiares de precipitação no Concelho da Povoação. *V Congresso Nacional de Geomorfologia*. Porto, 327-332.
- Nunes, J. C. (1991). *Microsismos e neotectónica. Contribuição para o seu estudo nos Açores* (Tese). Universidade dos Açores
- Nunes, J. C., Forjaz, V. H. & França, Z. (2001). Principais sismos destrutivos no Arquipélago dos Açores – Uma revisão. 5º Encontro Nacional de Sismologia e Engenharia Sísmica. Frago, M.R. (Ed.), Ponta Delgada, Portugal, 119-131.
- Oliveira, C. S. (1992). Preâmbulo. Monografia "10 anos após o sismo dos Açores de 1 de Janeiro de 1980", vol 1. Oliveira, C.S., Lucas, A. & Guedes, J., Laboratório Nacional de Engenharia Civil (Eds.), Lisboa, II-III.

- Oliveira, C.S. & Malheiro, A. (1999). The Faial, Pico, São Jorge Azores Earthquake of July 1998. *Second International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, Vol. 2. Seco e Pinto, P. (Ed.), Lisboa, 779-784.
- Pereira, P. (1997). A estabilidade geomecânica da costa rochosa. *6º Congresso Nacional de Geotecnia. Soc. Port. Geotecnia*, Centro de Geotecnia do I.S.T. (Eds.), Lisboa, 515-524.
- Pomonis, A., Spence, R. & Baxter, P. (1999). Risk assessment of residential buildings for an eruption of Furnas Volcano, São Miguel, the Azores. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 92 (1-2), 107-131.
- Ruiz, R. M. & Gijón, M. F. (1994). Methodology for landslides hazard map 1:10 000 in the area of Monachil (Granada, Spain). *7th International LAGE Congress*. Oliveira, R., Rodrigues, L.F., Coelho, A.G., Cunha, A.P. (Eds.), Lisboa, p. 2059-2064.
- Socero, A. (1992). O sismo de 1 de janeiro de 1980 no grupo central dos Açores. Efeitos e ações. Consequências 11 anos depois. Monografia “10 anos após o sismo dos Açores de 1 de janeiro de 1980”, vol 1. Oliveira, C.S., Lucas, A. & Guedes, J., Laboratório Nacional de Engenharia Civil (Eds.), Lisboa, 313-331.
- Turrini, M. C. & Visintainer, P. (1998). Proposal of a method to define areas of landslide hazard and application to an area of the Dolomites, Italy. *Engineering Geology*, 50, 255-265.
- Valadão, P. (2002). *Contribuição para o estudo de movimentos de vertente nos Açores (Tese de Mestrado)*. Departamento de Geociências da Universidade dos Açores, 107 p.
- Wasoski, J. & del Gaudio, V. (2000). Evaluating seismically induced mass movement hazard in Caramanico Terme (Italy). *Engineering Geology*, 58, 291-311.

**DESAFIOS E NOVOS INSTRUMENTOS PARA
MONITORIZAÇÃO, PREVENÇÃO E MITIGAÇÃO DE
RISCOS NATURAIS NOS AÇORES**

**CHALLENGES AND NEW INSTRUMENTS FOR
MONITORING, PREVENTION AND MITIGATION OF
NATURAL RISKS IN THE AZORES ISLANDS**

Alonso Teixeira Miguel

Secretário Regional do Ambiente e Alterações Climáticas (Portugal)
XIII Governo Regional dos Açores
alonso.t.miguel@azores.gov.pt

Resumo: As alterações climáticas são a maior ameaça ambiental do século XXI, com efeitos nefastos e transversais a diversas áreas da sociedade. Estes são desafios que ganham ainda maior relevância em ilhas como as dos Açores, de pequenas dimensões, dispersas e remotas, que estão sujeitas a uma acrescida vulnerabilidade aos efeitos das alterações climáticas e numa altura em que esses efeitos já se têm feito sentir de forma evidente na Região.

Desde modo, é fundamental a implementação de mecanismos e instrumentos para a adaptação e mitigação às alterações climáticas nesta região ultraperiférica, o arquipélago dos Açores .

Palavras-chave: Perigos naturais, movimentos de vertente, alterações climáticas, mitigação, adaptação, risco.

Abstract: Climate change is the greatest environmental threat of the 21st century, with harmful effects across various areas of society. These are challenges that become even more relevant in islands like the Azores, which are small, dispersed, and remote and subject to increased vulnerability to the effects of climate change at a time when these effects have already been clearly felt in the region. It is therefore essential to implement mechanisms and instruments to adapt to and mitigate climate change in this outermost region, the Azores archipelago.

Keywords: Natural hazards, landslides, climate change, mitigation, adaptation, risk.

Introdução

No âmbito do “XV Encontro de Riscos”, realizado entre os dias 4 e 5 de novembro de 2022, no Auditório Municipal da Povoação, na ilha de São Miguel, Açores, pretendeu-se elencar um conjunto de projetos e investimentos em curso com vista a dotar a Região de instrumentos fundamentais para melhorar a capacidade de previsão, monitorização e mitigação do risco associado a movimentos de vertente e outros perigos naturais, para aumentar a capacidade de proteção e auxílio às nossas populações e para melhorar o planeamento de emergência.

O arquipélago dos Açores é geologicamente recente e está localizado numa região ativa do ponto de vista vulcânico e tectónico, pelo que não é de surpreender que esteja sujeito a muitos perigos naturais, como terramotos, erupções vulcânicas, movimentos de vertente, cheias e fenómenos de erosão em áreas costeiras.

Esta realidade tende a agravar-se em resultado dos efeitos das alterações climáticas, que se têm feito sentir de forma evidente nos Açores, nomeadamente no que se refere à maior frequência e intensidade com que ocorrem determinados fenómenos climatéricos extremos, tornando as estratégias de monitorização e mitigação dos impactos destes fenómenos naturais cada vez mais exigentes e desafiantes.

Estas são, portanto, matérias que merecem profundas reflexões e uma posição clara e pragmática por parte da Administração Pública Regional, consubstanciando no melhor conhecimento científico disponível as opções tomadas no domínio do planeamento e na mitigação dos riscos.

Os Riscos Naturais nos Açores

A geodinâmica complexa e a localização geográfica do arquipélago Açores, na interceção de 3 placas litosféricas: a americana, a euroasiática e a africana, levam a que as ilhas sejam frequentemente afetadas por uma grande diversidade de perigos naturais.

Adicionalmente, a natureza vulcânica e a exposição das ilhas a um determinado conjunto de fatores geológicos, geomorfológicos e meteorológicos, fazem com que o arquipélago seja vulnerável à ocorrência de movimentos de vertente, que, historicamente, foram responsáveis pela perda de vidas humanas e por avultados prejuízos e danos materiais. Os movimentos de vertente não são tão impressionantes, nem causam tantos prejuízos financeiros, quanto os sismos, grandes cheias ou outras catástrofes naturais. Todavia, à escala global, são muito mais abrangentes e, ao longo do tempo, podem vir a causar mais danos materiais do que qualquer outro tipo de evento geológico (Varnes *et al.*, 1984).

No que se refere à definição do risco, o Professor Fernando Rebelo (1999), do Instituto de Estudos Geográficos da Faculdade de Letras da Universidade de Coimbra, refere que, *“Independentemente das palavras utilizadas, está, na prática, aceite, por quase todos os que se dedicam a este tipo de estudos, que o risco é, então, o somatório de algo que nada tem a ver com a vontade do homem (aleatório, acaso, casualidade ou perigosidade), com algo que resulta da presença directa ou indirecta do homem, ou seja, a vulnerabilidade”*.

Na verdade, só há risco se existirem elementos expostos ou de vulnerabilidade. Sem esses, o risco não existe.

Portanto, viver nos Açores é saber lidar com o facto de estarmos expostos a um risco elevado de ocorrência de uma enorme diversidade de perigos naturais.

No que aos movimentos de vertente diz respeito, são muitos os registos de acontecimentos verificados um pouco por todas as ilhas desde o início da nossa presença no arquipélago, como a escoada detrítica que soterrou Vila Franca do Campo, a 22 de outubro de 1522.

A ilha de São Miguel e o Concelho da Povoação apresentam, de facto, uma enorme reincidência de eventos desta natureza, como tão bem inventaria e documenta o Doutor Rui Marques na sua dissertação de doutoramento, no âmbito da qual estuda os movimentos de vertente no Concelho da Povoação e que tem como um dos principais resultados uma carta de suscetibilidade a movimentos de vertente daquela área. Neste concelho, para além do evento da Ribeira Quente em 1997, muito recentemente verificaram-se outros eventos com severos impactos, como, por exemplo, os que ocorreram em março de 2005 na Povoação e em março de 2013 no Faial da Terra, que resultaram, em ambos os casos, na morte de 3 pessoas e em avultados danos materiais.

No que concerne ao conhecimento dos riscos, a Região trilhou, e continuará a trilhar, um caminho de investimento no sentido de melhorar o conhecimento dos riscos em presença, suportando-se nos trabalhos da academia, bem como na aplicação das melhores técnicas disponíveis.

De forma sumária, o processo de conhecimento ou tratamento do risco pode desenvolver-se, genericamente, em 5 passos, iniciando-se com a identificação dos riscos, atendendo às características intrínsecas ao local, seguindo-se a avaliação, prevenção, mitigação e monitorização.

Nesta perspetiva, os Açores reúnem um conjunto variado de riscos naturais os quais, em muitos casos, são verificados cumulativamente em certas partes do território, como nos casos de secas, galgamentos costeiros, tempestades e furacões, bem como ao nível da erosão costeira, emanações gasosas e sismos. É frequente, no seguimento de um fenómeno sísmico, o desencadeamento de movimentos de vertente. Ou, no âmbito de situações meteorológicas extremas, vemos associados fenómenos de movimentos de vertente, cheias e inundações. O efeito multiplicador destes fenómenos torna o processo de previsão extremamente complexo, resultando frequentemente em impactos devastadores.

Ao nível da avaliação, segue-se alguns exemplos de trabalhos realizados relativamente a diferentes perigos naturais.

Neste caso, dá-se como exemplo o trabalho de avaliação de riscos realizados pelo Centro de Informação e Vigilância Sismo-Vulcânica dos Açores (CIVISA), em 2019, no contexto do estudo “Avaliação dos perigos geológicos e respetivas áreas vulneráveis a considerar no ordenamento do território da Região Autónoma dos Açores”, no âmbito do qual foi produzida cartografia relativa a Emanações Gasosas Permanentes, à escala 1:25.000, no caso, em concreto para a Suscetibilidade de Desgaseificação Difusa de CO², na freguesia de Furnas, em São Miguel. Apesar da cartografia em questão ter sido produzida apenas para as ilhas de São Miguel e Terceira, foi produzida outra cartografia relativa à localização de fumarolas e áreas de desgaseificação, que abrange as ilhas de São Miguel, Terceira, Graciosa, Pico e Faial. Toda esta informação pode ser consultada no portal do Ordenamento do Território dos Açores, na secção de riscos naturais.

No que toca aos movimentos de vertente, também foi desenvolvido em 2019 um trabalho pelo CIVISA, a pedido da então Direção Regional do Ambiente, e no âmbito do estudo anteriormente mencionado, cartografia à escala 1:25.000, relativa à suscetibilidade para movimentos de vertente, abrangendo todas as ilhas da Região.

Também em relação a esta matéria, e com base nos dados da rede hidrometeorológica dos Açores, constituída por 99 estações distribuídas por todas as ilhas, o CIVISA produz e emite alertas para movimentos de vertente, que são enviados para o Serviço Regional de Proteção Civil e Bombeiros dos Açores.

Instrumentos de avaliação e monitorização implementados nos Açores

Em matéria de cheias e inundações, a Região atualizou recentemente a cartografia produzida no âmbito da elaboração do 1º ciclo do Plano de Gestão de Riscos de Inundação da Região Autónoma dos Açores, num trabalho levado a cabo pela Fundação Gaspar Frutuoso e a Universidade dos Açores. Trata-se de um trabalho realizado no âmbito do processo de elaboração do segundo ciclo de planeamento, o qual incidiu não só sobre os galgamentos e inundações fluviais, mas incluiu, também, e pela primeira vez, a temática do risco de galgamento e inundação costeira.

No seguimento dos processos de alteração dos planos de ordenamento da orla costeira das ilhas Terceira, São Jorge e São Miguel, foi elaborada cartografia de pormenor de risco para galgamentos e inundações costeiras para as sedes de concelho, tendo, no caso de São Miguel, a Secretaria Regional do Ambiente e Alterações Climáticas determinado que seria estendida a mesma metodologia às restantes áreas edificadas da ilha, não incluídas nas sedes de concelho. Também para a ilha de São Jorge, foi elaborada essa mesma cartografia de pormenor, enquanto medida prevista no programa de execução do diploma entretanto aprovado e publicado.

Resultante do processo de identificação e avaliação da suscetibilidade a determinados de fenómenos naturais, é possível, através de um correto planeamento territorial, com a criação de regimes de gestão ou princípios orientadores, projetar o desenvolvimento do território considerando estes fatores, o que permite, de forma consciente e estratégica, prevenir a exposição ao risco. Porém, tal trabalho é facilitado quando a programação urbanística é feita previamente à sua implementação, o que raramente acontece, obrigando a uma atuação tardia, com a definição de regras e regimes de gestão mais complexos e com menor grau de aceitação por parte da população.

Aquando da elaboração dos primeiros instrumentos de gestão territorial na Região, a informação relativa aos riscos naturais era dispersa e pouco estruturada. Desde então, um longo percurso foi trilhado no sentido da identificação e conhecimento dos riscos naturais, caminho esse que, à presente data, e no seguimento da alteração/revisão de muitos destes instrumentos, garante a inclusão nos novos instrumentos de planeamento da temática dos riscos, com especial incidência para as cheias, galgamentos e inundações, movimentos de vertente e emanações gasosas.

De acordo com o disposto no artigo 6.º do Programa Regional para as Alterações Climáticas, o departamento do Governo Regional dos Açores com competência em matéria de Ordenamento e Território é responsável pela elaboração de cartografia de base à escala 1:25.000 ou superior, com o objetivo de disponibilizar informação técnica que acautele a exposição e vulnerabilidade do território a cheias, inundações, movimentos de vertente e emanações gasosas permanentes. Esta informação é obrigatoriamente vertida nos Planos Especiais de Ordenamento e Território e Planos Municipais de Ordenamento do Território, que devem desenvolver cartografia de pormenor, à escala 1:2000 ou superior, sempre que visem determinar o afastamento de edificações, equipamentos ou infraestruturas de zonas de risco significativo.

Uma outra matéria fundamental, que permite atuar ao nível da prevenção, passa pela delimitação a nível municipal da estrutura da Reserva Ecológica Regional, a qual se rege pelo disposto no Regime Jurídico da Reserva Ecológica Nacional (RJREN), aprovado pelo Decreto-Lei n.º 166/2008, de 22 de agosto, alterado pelo Decreto-Lei n.º 124/2019, de 28 de agosto de 2019, que permite, dentro das zonas ameaçadas por cheias, pelo mar e adjacentes, mas também em áreas de elevado risco de erosão hídrica do solo e de instabilidade de vertentes, salvaguardar um conjunto de situações de risco, com regimes de gestão impeditivos ou altamente condicionados.

Verificada a suscetibilidade a determinados fenómenos, bem como a presença humana em determinadas áreas do território, sobram apenas 2 alternativas: a deslocalização das populações ou a mitigação e gestão dos riscos.

Neste sentido, o Governo Regional dos Açores elaborou o 2º ciclo de planeamento do Plano de Gestão de Riscos de Inundações da Região Autónoma dos Açores (PGRIA), o qual, além de incluir as 5 bacias hidrográficas já consideradas no primeiro plano, acrescentou 6 novas bacias hidrográficas, perfazendo um total de 11 bacias hidrográficas de risco, incidindo, pela primeira vez, também ao nível dos riscos de galgamentos e inundações costeiras, sinalizando 4 zonas com elevado risco, as quais foram alvo de episódios históricos com perdas de vidas ou bens materiais. Trata-se de um plano com carácter operacional, com um conjunto de medidas específicas com vista à melhor gestão do risco ou à sua minimização.

No 1º ciclo do PGRIA (2016-2021) foram consideradas 5 bacias hidrográficas de risco:

- Ribeira Grande, Flores;
- Ribeira da Agualva, Terceira;
- Ribeiras do Porto Judeu, Terceira;
- Ribeira Grande, São Miguel;
- Ribeira da Povoação, São Miguel.

Foram selecionadas 6 novas bacias hidrográficas, com base nos trabalhos de caracterização do 2º ciclo de planeamento do PGRIA, considerando os episódios de cheias registados, com danos significativos:

- Grota da Areia, Ponta Delgada, São Miguel;
- Grota do Cinzeiro, Nordeste, São Miguel;

- Ribeira de São Bento, Angra do Heroísmo, Terceira;
- Ribeira da Casa da Ribeira, Praia da Vitória, Terceira;
- Ribeira Seca, Calheta, São Jorge;
- Ribeira do Dilúvio, Madalena, Pico.

Relativamente ao risco de galgamento e inundação costeira, foram identificadas 4 zonas com elevado risco na Região, com episódios históricos de danos materiais:

- São Roque (São Miguel);
- Lagoa (São Miguel);
- Ribeira Quente (São Miguel);
- São Roque do Pico (Pico).

Uma das componentes fundamentais nos processos de acompanhamento de riscos baseia-se na capacidade de monitorizar a sua evolução temporal. E nesse sentido, a Secretaria Regional do Ambiente e Alterações Climáticas, através da Direção Regional do Ordenamento do Território e dos Recursos Hídricos, cumpre com esse desiderato através de vários contratos de monitorização de zonas de risco dos Açores, como seja o caso da Monitorização Geodésica, Inclinométrica e Piezométrica e Aplicação de Técnicas de Prospeção Geofísica para o Acompanhamento e Caracterização de Movimentos de Vertente na Maia, Praia Formosa e Panasco, na de ilha Santa Maria, um trabalho desenvolvido pelo CIVISA desde 2010.

No âmbito do PO Açores 2020, foi elaborada uma candidatura para criação de uma rede de monitorização de zonas de risco dos Açores, denominado AZMONIRISK, tendo por base o levantamento e priorização de localizações realizado pelo Laboratório Regional de Engenharia Civil (LREC) em 2015. Nesse sentido, foi efetuada a instalação de um conjunto de equipamentos de medição geodésica, inclinométrica e piezométrica, na zona da Fajãzinha (Flores), vertentes do núcleo urbano da Calheta (São Jorge) e Ribeira Quente e Faial da Terra (São Miguel).

Novos instrumentos e projetos em curso nos Açores

Atendendo a que é necessário promover o mesmo tipo de monitorização noutras zonas identificadas como de elevado risco, está previsto o alargamento da rede do AZMONIRISK, através do projeto Life IP Climaz.

Também será dado seguimento à implementação de uma rede multitécnica para monitorização de elementos percursos de instabilidade hidrogeomorfológica na zona da Ponta da Fajã, ilha das Flores, de acordo com o deliberado pela Assembleia Legislativa da Região Autónoma dos Açores e com o levantamento efetuado e solução técnica proposta pelo LREC.

Ao nível da geoquímica de gases, decorre atualmente um contrato com o CIVISA, relativo ao Sistema de Monitorização, Alerta e Alarme para a segurança dos visitantes da Furna do Enxofre, na ilha Graciosa.

Para evitar situações idênticas às que ocorreram no dia 31 de outubro de 1997 que, fruto de uma derrocada sem precedentes, isolou a freguesia da Ribeira Quente do Município da Povoação, ilha de São Miguel, está em curso uma intervenção fundamental para a melhoria das condições de segurança e reduzir o risco associado à ocorrência de movimentos de vertente, naquele que continua a ser o único acesso a esta freguesia do concelho da Povoação, que atravessa vertentes altas e declivosas e que apresenta elevadíssima suscetibilidade à ocorrência deste tipo de fenómeno natural.

Trata-se de um investimento que tem por objetivo assegurar a estabilização de taludes em 14 troços, numa extensão total de cerca de 4 kms, com operações de reperfilamento de taludes com escavação e drenagem, construção de muros de suporte e valões, estabilização de taludes com redes pregadas, e ainda com a construção de um semi-túnel num troço com cerca de 210 m (fot. 1).

Está também em curso o procedimento para instalação de 2 radares meteorológicos de polarização dupla, em São Miguel e nas Flores.

Trata-se de um investimento, no âmbito do Plano de Recuperação e Resiliência, da responsabilidade do Instituto Português do Mar e da Atmosfera, que, em complemento à instalação do radar meteorológico da Serra de Santa Bárbara, na Ilha Terceira, em 2020, permitirá concluir a rede regional de radares, aumentando significativamente a capacidade de previsão meteorológica da Região, garantindo uma cobertura integral do arquipélago.

Os equipamentos a instalar apresentam as seguintes características/capacidades:

- Alcance de 200 km;
- Uma previsão de precipitação a muito curto prazo, permitindo a distinção entre chuva e granizo;
- Obtenção de dados da precipitação de 10 em 10 min;
- Cobertura geográfica de toda a Região com os 3 radares;
- Melhor qualidade das observações nas zonas de sobreposição;



Fot. 1 - Projeto para a melhoria das condições de segurança da ER 2-2ª de acesso à freguesia da Ribeira Quente (Fotografia de Direção Regional das Obras Públicas, maio de 2022).

***Photo 1** - Project to improve the safety conditions of the ER 2-2nd access to the parish of Ribeira Quente (Photography by Direção Regional das Obras Públicas, May 2022).*

- Permitirá a cobertura total, em alguns casos, de tempestades severas e com uma dimensão espacial de algumas centenas de km (exemplo ciclones tropicais).

A par dos radares meteorológicos serão também instalados 3 detetores de trovoadas que permitirão detetar instantaneamente a localização, a frequência, intensidade, polaridade e multiplicidade dos raios. Os 3 equipamentos previstos irão garantir a cobertura integral do arquipélago, e a informação obtida com esta rede será utilizada em climatologia de trovoadas, que permitirá apoiar estudos de gestão do território e alterações climáticas.

Os efeitos das Alterações climáticas têm vindo a fazer-se sentir de uma forma cada vez mais evidente nos Açores, sobretudo no que se refere a fenómenos meteorológicos extremos, afetando de modo severo as populações, com impactos financeiros e patrimoniais significativos, como foi o caso em 2021 que afetou principalmente as freguesias dos Mosteiros e Feteiras, na ilha de São Miguel.

Na Região Autónoma dos Açores não existia nenhum instrumento com enquadramento legal que permitisse o apoio financeiro às famílias e empresas para fazer face aos prejuízos patrimoniais causados pelas intempéries. Nesse sentido, surgiu a necessidade de se criar um instrumento para a implementação de medidas excecionais que, no âmbito da ocorrência de fenómenos meteorológicos extremos no Arquipélago, permitam apoiar as populações afetadas e fazer face aos prejuízos patrimoniais, visando, no imediato, minimizar os danos sofridos, quando estes não sejam abrangidos por outros sistemas de apoio em vigor.

Neste contexto, foi criado o Regime jurídico-financeiro de apoio à emergência climática, pelo Decreto Legislativo Regional n.º 14/2022/A, de 1 de junho, que visa dar resposta a situações de perdas e danos patrimoniais, resultantes da ocorrência de fenómenos meteorológicos extremos, bem como suportar investimentos públicos destinados à mitigação dos impactes das alterações climáticas e dos seus efeitos. Uma extraordinária medida para apoiar quem muitas vezes perde o trabalho de uma vida de um momento para o outro e que permite corresponder, solidariamente, a todos aqueles que precisam de ser reerguer perante as adversidades que enfrentaram. O financiamento desta medida de apoio decorre da aplicação da taxa sobre a disponibilização de sacos de plástico na Região Autónoma dos Açores.

Associado à temática dos riscos, a Secretaria Regional do Ambiente e Alterações Climáticas, através da Direção Regional do Ordenamento do Território e dos Recursos Hídricos, desencadeou 2 projetos, no âmbito do programa REACT-EU, nomeadamente um projeto para Implementação de sistemas de alerta de cheia em bacias de risco na Região Autónoma dos Açores, para minimização de riscos naturais, e um projeto de Elaboração de Cartografia de Risco para a mitigação e adaptação das alterações climáticas. Em ambos os casos, trata-se da implementação de medidas previstas em instrumentos de planeamento no domínio dos riscos naturais e alterações climáticas.

A implementação de sistemas de alerta de cheia em bacias de risco na Região Autónoma dos Açores para minimização de riscos naturais permitirá:

- Detecção de possíveis movimentos de massa que possam provocar obstruções/represamentos do curso de água;
- Observação das condições de escoamento em tempo real, através da instalação de webcams;

- Validação dos tempos de concentração;
- Avaliação da capacidade da resposta dos cursos de água face às condições meteorológicas;
- Monitorização e conhecimento do ciclo hidrológico nas bacias hidrográficas;
- Instalação de estações udométricas para análise, em tempo real, das condições meteorológicas;
- Instalação de sensores ao longo das linhas de água de modo a detetar caudais atípicos bem como a presença de caudais sólidos;
- Validação dos modelos utilizados com recurso aos dados reais;
- Criação de um centro de análise e processamento de dados que permita, com base no histórico de ocorrências e com os dados em tempo real, otimizar continuamente o modelo alerta a implementar.

Procedeu-se, ainda, à avaliação dos locais e equipamentos a instalar, incluindo a arquitetura do sistema, com o suporte técnico e científico do CIVISA.

O projeto prevê o desenvolvimento da medida RH9_S055 do 1º ciclo do PGRI, em 4 das 11 bacias hidrográficas de risco do 2º ciclo do PGRI:

- Bacia hidrográfica da Ribeira da Povoação, São Miguel;
- Bacia hidrográfica da Ribeira da Agualva, Terceira;
- Bacia hidrográfica da Ribeira do Dilúvio, Pico;
- Bacia hidrográfica da Ribeira Seca, São Jorge.

O Projeto de Elaboração de Cartografia de Risco para a mitigação e adaptação das Alterações Climáticas pretende atingir os seguintes objetivos:

- Realização do levantamento aerofotogramétrico com varrimento LIDAR;
- Realização de cartografia vetorial à escala 1:2000 das áreas edificadas e 1:10000 para as restantes áreas;
- Realização de cartografia temática – galgamentos e inundações costeiras;
- Aquisição de 4 estações totais, de 4 estações GNSS, de 9 drones quadrirotores com RTK, de 3 drones quadrirotores com RTK e sensor LIDAR, de 1 laser scanner, e de 1 estação permanente;
- Aquisição de workstations e módulos de expansão de memória;
- Aquisição de scanner fotogramétrico;
- Aquisição de 2 drones de asa fixa de longo alcance.

Considerações finais

Com equipamentos deste género será possível melhorar significativamente a produção de cartografia de precisão a ser usada, por exemplo, nos modelos de previsão de inundações fluviais ou costeiras, para definição dos traçados das linhas de água cobertas por vegetação ou para monitorizar o avanço de arribas costeiras face a fenómenos de erosão hídrica do solo, sendo também ferramentas fundamentais para a salvaguarda das populações e para o planeamento de emergência.

Bibliografia

- Marques, R. (2013). *Estudo de Movimentos de vertente no Concelho da Povoação (Ilha de São Miguel, Açores): Inventariação, caracterização e análise de suscetibilidade*. Dissertação de Doutoramento em Geologia, especialidade de Riscos Geológicos. Departamento de Geociências. Universidade dos Açores. Ponta Delgada. 644 p.
- Varnes DJ e IAEG-CLOMMS - International Association of Engineering Geology- Commission on landslides and other mass movements on slopes (1984). *Landslide hazard zonation: a review of principles and practice*. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. UNESCO Press. Paris.

**DETEÇÃO DE PRECUSSORES DE ATIVIDADE
GEOMORFOLÓGICA NOS TALUDES DA ESTRADA
LOMBINHA DA MAIA COM RECURSO A UMA
ESTAÇÃO TOTAL**

**DETECTION OF GEOMORPHOLOGICAL ACTIVITY
PRECURSORS ON THE SLOPES OF LOMBINHA DA
MAIA ROAD USING A TOTAL STATION**

André Santos*

andre.a.santos@azores.gov.pt

Ana Maria Malheiro*

ana.mm.malheiro@azores.gov.pt

Paulo Amaral*

paulo.ap.amaral@azores.gov.pt

Filipe Marques *

filipe.mp.marques@azores.gov.pt

Letícia Cunha*

leticia.cm.moniz@azores.gov.pt

*Laboratório Regional de Engenharia Civil - Açores (Portugal)

Resumo: A Câmara Municipal da Ribeira Grande (ilha de S. Miguel) solicitou ao Laboratório Regional de Engenharia Civil - Açores apoio na monitorização de taludes intervencionados por obras de estabilização geotécnica, situados no ramal da Lombinha da Maia. O sistema de monitorização preconizado, com vista à avaliação de eventuais precursoros de atividade geomorfológica, baseou-se na observação das deformações do terreno por intermédio de métodos topográficos (e.g., Estação total). Foram estabelecidas quatro sub-redes (SR1, SR2, SR3 e SR4) ao longo do ramal, de modo a abranger os principais setores da área intervencionada. Os dados obtidos até dezembro de 2022 nas sub-redes SR1, SR2 (SR2.1, SR2.2) e SR3 não evidenciaram qualquer

alteração movimentação no talude. No entanto, na SR4 verificaram-se variações significativas em algumas das marcas de observação, com deslocamentos na ordem dos 10 mm. Foram estabelecidos critérios de alerta e alarme de 0,020 m e de 0,060 m, tendo-se em consideração 20% e 50%, respetivamente, do deslocamento máximo admissível depois da intervenção. Presentemente, o deslocamento máximo observado, de 0,012 m, já atingiu 60% do critério de alerta.

Palavras-chave: Contenção de taludes, deslocamento máximo admissível, critério de alerta e alarme.

Abstract: The Ribeira Grande City Council (S. Miguel Island) requested the Regional Civil Engineering Laboratory - Azores for support in monitoring slopes that have been subjected to geotechnical stabilisation works on the Lombinha da Maia road. In order to assess possible precursors of activity, the monitoring system was based on the observation of terrain deformations using topographic methods (e.g. Total Station). Four sub-networks were established (SR1, SR2, SR3, and SR4) along the road to cover the main sectors of the intervention area. The data obtained up to December 2022 in the sub-networks SR1, SR2 (SR2.1, SR2.2), and SR3 did not show any change in movement on the slope. However, in SR4 there were significant variations in some of the observation marks with displacements in the order of 10 mm. Alert and alarm criteria of 0.020 m and 0.060 m were established, respectively taking into account 20% and 50% of the maximum permitted displacement after the intervention. Currently, the maximum displacement observed of 0.012 m has already reached 60% of the alert criterion.

Keywords: Slope stability, maximum permitted displacement, alert and alarm criteria.

Introdução

A maioria dos estragos provocados por movimentos de vertente no arquipélago dos Açores estão normalmente associados a eventos desencadeantes como sismos moderados a fortes, precipitações intensas de curta e/ou prolongada duração, entre outros fatores.

Dependendo do contexto, em muitas situações (*e.g.*, dimensão da área potencial instável, volumetria solicitada, presença de elementos expostos ao risco, etc.), as medidas mitigadoras normalmente estão direcionadas para soluções de engenharia robustas, com vista à estabilização e proteção dos taludes (*e.g.*, muros de contenção, apoiados ou não com ancoragens, pregagens, alteração da geometria, drenagens superficiais e internas, betão projetado, etc.) para aplicações de sistemas de alerta e alarme e para a educação pública (*e.g.*, Corominas *et al.*, 2005; Uchimura *et al.*, 2015).

Nas soluções de engenharia geotécnica com vista à estabilização e proteção de taludes, as estruturas são sujeitas a ações que, em último caso, podem potenciar processos de rotura.

Neste contexto, nas fases de execução e de exploração das soluções de engenharia geotécnica estas devem ser alvo de um plano de observação e auscultação, através de dispositivos de monitorização que permitam a medição de diferentes grandezas, de modo a garantir a segurança e evitar danos que impliquem maiores custos durante o seu tempo de vida (Pinto de Sousa, 2020).

No arquipélago dos Açores, a grande maioria das obras que contemplam estruturas geotécnicas não apresentam planos de observação e auscultação, em particular com critérios de alerta e alarme definidos, e se contemplam, raramente, são colocados em prática pelo Dono da Obra. Tais planos de observação possibilitam a interpretação dos resultados provenientes das campanhas de leituras efetuadas com a instrumentação e verificar se os deslocamentos observados se encontram dentro dos limites previstos em fase de projeto. A ausência de critérios de alerta e de alarme dificultam uma avaliação quantitativa do estado de funcionalidade e de segurança das soluções implementadas (Pinto de Sousa, 2020; Tomásio e Pinto, 2016).

Os taludes contíguos ao ramal da freguesia da Lombinha da Maia, no concelho da Ribeira Grande (ilha de São Miguel – Arquipélago dos Açores), pelo seu historial

de instabilização geomorfológica, foram alvo de reforço geotécnico, em 2020, com recurso a betão projetado e pregagens, numa extensão de cerca de 215 m. Durante a obra, a cargo da Câmara Municipal da Ribeira Grande (CMRG), em janeiro de 2021, ocorreu um acidente geotécnico (deslizamento de terras), tendo este provocado estragos nos equipamentos da obra e numa moradia, para além de atrasos na conclusão da mesma. Como resolução desta situação, foi reaplicado betão projetado e construído um muro de contenção em betão armado, no pé do talude, reforçado com ancoragens e microestacas.

Na ausência de um plano de observação e auscultação (fase de planeamento e fase de execução, e posteriormente exploração), para os taludes intervencionados, a CMRG solicitou ao Laboratório Regional de Engenharia Civil (LREC-Açores) apoio na implementação de uma rede de monitorização nos taludes intervencionados para avaliação de eventuais percursos de atividade geomorfológica, e na definição de critérios de alerta e de alarme para aferir as condições de segurança dos mesmos.

Enquadramento geológico e geotécnico da área de estudo

A área de estudo situa-se no ramal da Lombinha da Maia, que faz a ligação entre as freguesias da Maia e da Lombinha da Maia, no concelho da Ribeira Grande, ilha de São Miguel Açores (fig. 1).

A ilha de São Miguel apresenta um contexto geomorfológico e geológico bastante diversificado. Zbyszewsky (1959 e 1961) definiu para a ilha de São Miguel 8 regiões geomorfológicas. A área de estudo situa-se no designado Planalto Setentrional, num setor da costa norte da ilha de São Miguel que faz fronteira com o Vulcão do Fogo, o Planalto da Achada das Furnas, o Vulcão das Furnas e ainda o Vulcão da Povoação.

Do ponto de vista geológico, encontra-se uma diversidade de produtos vulcânicos, em particular, depósitos piroclásticos de queda e de fluxo, emitidos pelos vulcões poligenéticos das Furnas e do Fogo, e derrames lávicos de natureza basáltica (*s.l.*) emitidos por centros emissores monogenéticos existentes nos flancos norte entre aqueles vulcões centrais.

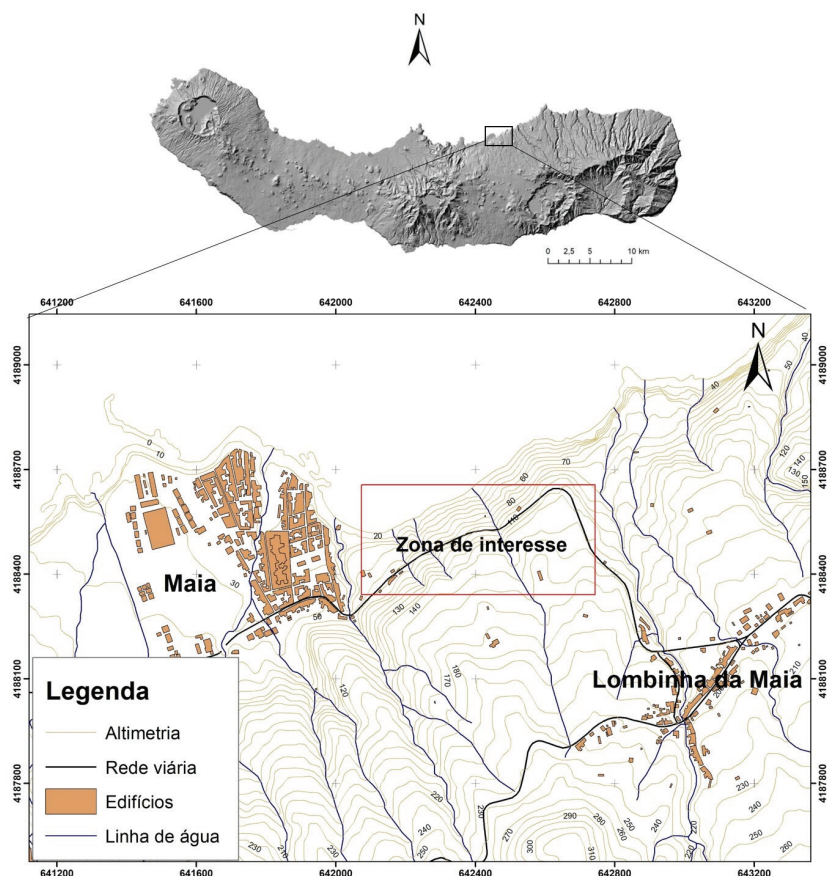
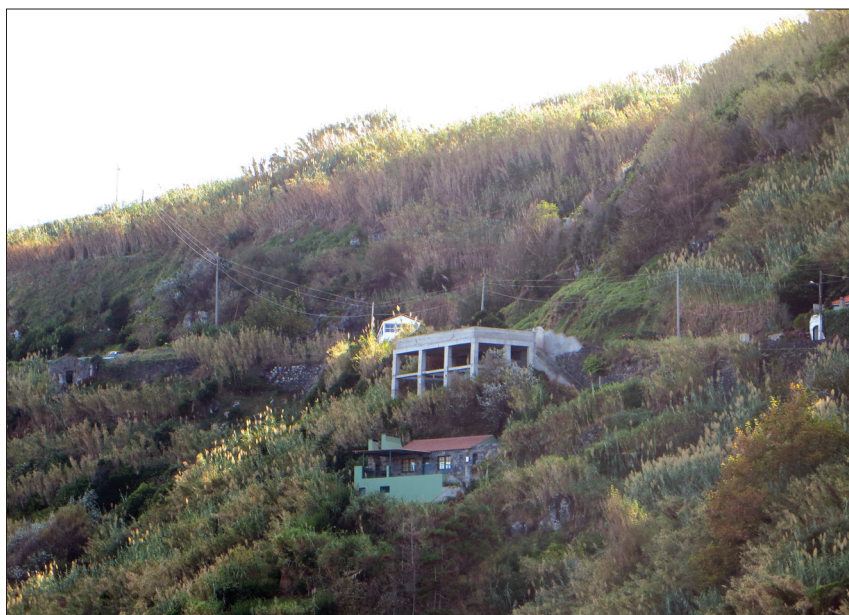


Fig. 1 - Localização do ramal da Lombo da Maia, no concelho da Ribeira Grande, ilha de São Miguel.

Fig. 1 - Location of Lombo da Maia road in Ribeira Grande municipality, São Miguel island.

O ramal da Lombo da Maia desenvolve-se ao longo de uma vertente, entre as cotas dos 50 e 110 m, com um declive médio de 40°. A plataforma da estrada apresenta um perfil misto com setores de escavação e de aterro. No setor da vertente subjacente ao ramal, ao longo do tempo, foram construídas algumas moradias, muitas delas de forma ilegal, para veraneio e habitação permanente (fot. 1).

Nos taludes de escavação do ramal, a constituição geológica apresenta uma variabilidade espacial. Alguns trechos são constituídos por depósitos de vertente



Fot. 1 - Vista geral da vertente onde se insere o ramal da Lombinha da Maia (fotografia obtida em 2015, antes da intervenção geotécnica dos taludes) (Fotografia de LREC - Açores, tirada a 13/10/2015).

Photo 1 - General view of the slope where is inserted the Lombinha da Maia road (photograph taken in 2015 before the geotechnical intervention in the slopes) (Photography by LREC - Azores taken on 13/10/2015).

(matriz areno siltosa com blocos e cascalhos rochosos misturados) e depósitos piroclásticos pomíticos (matriz areno-siltosa), e por rocha de natureza basáltica pouco a medianamente alterada e medianamente fraturada, com clinker intercalado. Superiormente, estes materiais são capeados por solos de natureza pomítica (fot. 2). Os taludes apresentam declives subverticais e alturas variáveis entre os 6 m até aos 35 m. Pontualmente, são observadas nascentes na base de níveis mais permeáveis.

O quadro geológico e morfológico existente no ramal municipal de ligação da Maia à Lombinha da Maia, no passado, apresentava um contexto favorável à ocorrência de movimentos de vertente, em particular da tipologia da queda de blocos rochosos, ao nível das escoadas lávicas e do clinker, e deslizamentos translacionais superficiais ao nível dos depósitos piroclásticos pomíticos e depósitos de vertente.



Fot. 2 - Constituição geológica de um setor (SR4 antes da intervenção), constituído pela alternância de rocha basáltica com clinker e capeado superiormente por depósitos piroclásticos pomíticos (Fotografia de LREC - Açores, tirada a 13/10/2015).

***Photo 2** - Geological constitution of a sector (SR4 before the intervention), consisting of basaltic lava flows with breccias and capped above by pyroclastic pumice deposits (Photography by LREC - Azores taken on 13/10/2015).*

Face à perigosidade geomorfológica, em 2020 a CMRG promoveu a realização de trabalhos de reforço geotécnico com recurso a betão projetado e a pregagens com vista à estabilização de vários troços da estrada, numa extensão de 215 m. A caracterização geológico-geotécnica das formações interessadas pela obra foi efetuada por meio de sondagens à rotação, ao nível da plataforma da estrada, e pelo reconhecimento geológico na face dos taludes com vista à sua caracterização física e mecânica dos materiais ocorrentes (Geotrota, 2016).

Em janeiro de 2021, durante a concretização da obra, ocorreu um acidente geotécnico num dos troços, desencadeado por precipitação intensa. Os trabalhos encontravam-se na fase final de execução. Uma das causas, para além da precipitação intensa, foi o facto de os trabalhos de estabilização, através da

aplicação da última camada de betão projetado na base do talude, e do sistema de drenagem superficial e profunda no corpo e base do talude, não estarem totalmente finalizados. A existência de uma barreira impermeável na face do talude, criada pela primeira camada de betão projetado promoveu a geração de impulsos hidrostáticos pelo aumento das pressões intersticiais no interior do maciço, levando à sua consequente instabilização geomorfológica. O deslizamento de terras provocou a destruição de equipamentos da obra e afetou uma moradia, para além de ter provocado atrasos inerentes à conclusão da obra. Como resolução desta situação foi reaplicado betão projetado com fibras e construído um muro de contenção, em betão armado, no pé do talude, reforçado com ancoragens e microestacas.

Rede de observação

Um pré-requisito fundamental para o entendimento do comportamento de um processo de instabilidade seja ele qual for (*e.g.*, movimentos de vertente, fenómenos de subsidência) ou de estruturas geotécnicas, é a avaliação da deformação através de equipamentos e técnicas específicas de monitorização.

Tendo em consideração as especificidades do ramal da Lombinha da Maia, o sistema de monitorização preconizado baseou-se na observação das deformações do terreno por intermédio de métodos topográficos (*e.g.*, Estação total), para obtenção de informação rigorosa em 3D, planimetria (X e Y) e altimetria (Z).

As medições são obtidas com recurso a uma estação total Leica, modelo TCR 1201, com precisão para as distâncias de 1 mm + 1ppm e para as medições angulares de 1".

Com este tipo de observações é possível avaliar a magnitude de potenciais percursos de atividade cinemática, antes da eventual ocorrência de modificações morfológicas que possam acontecer.

De modo a abranger os principais setores intervencionados, a rede de monitorização foi seccionada em quatro (4) sub-redes (SR1, SR2, SR3 e SR4) ao longo do ramal (fig. 2). Pela sua extensão, a SR2 foi dividida em SR2.1 e SR2.2.

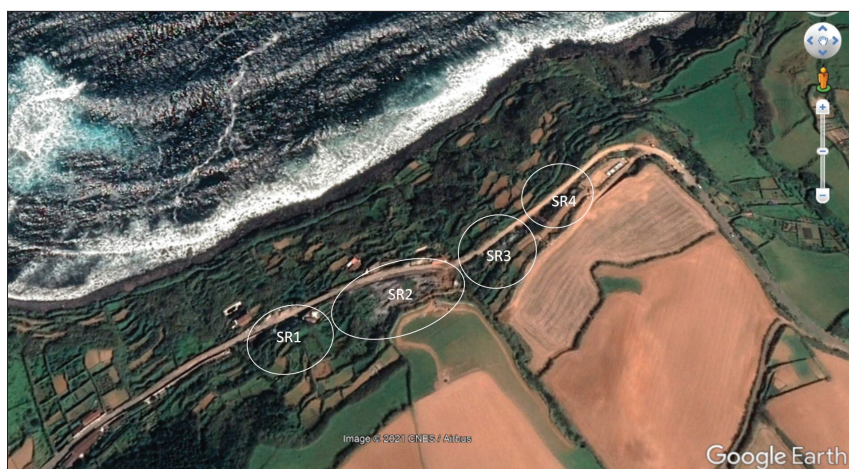


Fig. 2 - Localização dos setores intervencionados que constituem as sub-redes de observação.

Fig. 2 - Location of the intervention sectors that make up the observation sub-networks.

Para cada sub-rede foram instalados: pontos estação (PE - onde se realiza o estacionamento do equipamento de medição), pontos de referência (PR - constituem o quadro de referência, cuja posição pode ser considerada fixa ao longo do tempo;

servem também para validar as leituras dos pontos objeto), e pontos objeto (PO - aqueles cujos deslocamento representam uma variável de controlo; distribuem-se densamente ao longo dos diferentes setores potencialmente instáveis (Casaca *et al.*, 2000)). Os pontos de monitorização de cada sub-rede foram dispostos com uma configuração em quincôncio.

Os pilares de estacionamento e alvos topográficos foram instalados nos meses de abril e maio de 2022 por funcionários da CMRG (fig. 3.).

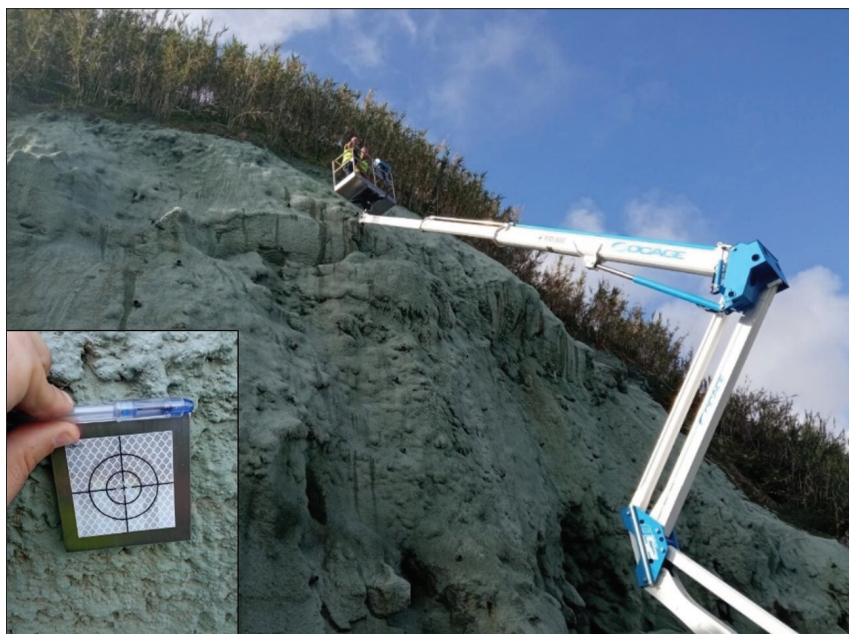


Fig. 3 - Trabalhos de instalação em altura de alvos topográficos.

Fig. 3 - Installation works at height of topographical targets.

A TABELA I resume de forma quantitativa os pontos distribuídos por cada sub-rede.

De referir que na SR3 foram vandalizados dois alvos, detetados a 24-06-2022 e a 28-06-2022, após o início das observações, totalizando à data 13 PO. Na SR4 foi igualmente vandalizado um alvo PO previamente ao início dos trabalhos de monitorização, totalizando à data 7 PO.

TABELA I - Quantificação dos pontos PE, PR e PO em cada sub-rede.

TABLE I - Quantification of PE, PR, and PO points in each sub-network.

	SR1	SR2		SR3	SR4
		SR2.1	SR2.2		
PE	1	1	1	1	1
PR	2	1	1	2	2
PO	12	9	21	15 (13)	8 (7)

As observações iniciaram-se em junho de 2022 (08-06-2022), por uma equipa de topógrafos da NORMA AÇORES.

Na SR2.2 os alvos estão distribuídos por toda a face do talude e no muro de contenção de betão armado materializado com ancoragens e microestacas.

Na TABELA II apresenta-se uma síntese do número das campanhas e datas de realização. Até à data foram efetuadas 16 campanhas de observação.

TABELA II - Datas de realização das campanhas de observação com recurso à estação total.

TABLE II - Observation campaign dates using the total station.

Data	
8-06-2022	8-07-2022
13-06-2022	19-07-2022
17-06-2022	29-07-2022
21-06-2022	30-08-2022
24-06-2022	26-09-2022
28-06-2022	24-10-2022
01-07-2022	24-11-2022
5-07-2022	15-12-2022

Resultados obtidos

Os dados apresentados reportam-se até dezembro de 2022. Desde o início das observações, a 08-06-2022, até à última campanha efetuada, a 15-12-2022, os dados obtidos na sub-rede SR1, SR2 (SR2.1, SR2.2) e SR3 não apresentaram grandes variações nas componentes planimétricas e altimétrica dos alvos monitorizados (fig. 4). No geral todos os pontos têm tido um comportamento esperado, com deslocamentos reduzidos ou inexistentes.

O tratamento/processamento dos dados foi efetuado de acordo com o princípio do método dos mínimos quadrados, utilizando-se intervalos de confiança de 95%. Os Erros Médios Quadráticos (EMQ) obtidos entre leituras, quer para as componentes planimétrica e altimetria, foram na ordem de grandeza de ± 2 mm.

As variações registadas ao longo do tempo de monitorização, maioritariamente com quantitativos na ordem dos 1 e 2 mm, estão inseridas dentro do erro de medição e intervalo de confiança.

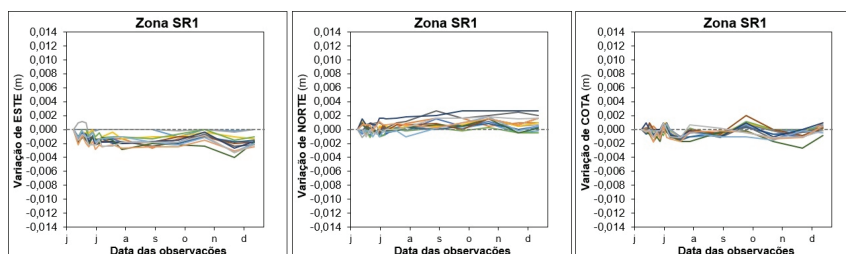


Fig. 4 - Exemplo de alguns registos das observações:
coordenadas Este, Norte e Cota para a SR1.

*Fig. 4 - EExample of some records of observations:
East, North, and Elevation coordinates for SR1.*

No que diz respeito à SR4, verificaram-se variações significativas em algumas das marcas de observação. Algumas das variações são de reduzida magnitude, à semelhança do que se verifica nas restantes sub-redes, enquadrando-se em oscilações permissivas, resultado de erros sistemáticos e instrumentais, intrínsecos à precisão do equipamento, do seu estacionamento e do sistema de observação manual.

No entanto, verifica-se que algumas das marcas da SR4 demonstram variações da componente planimétrica (E e N) com valores até 12 mm (fig. 5). Verifica-se que desde a campanha zero (estabelecimento do nível de referência), os deslocamentos apresentaram uma tendência evolutiva, sensivelmente, até à sétima campanha (05-07-2022), estando desde então até ao momento com uma tendência de estabilização.

Inspecções visuais ao talude não permitiram detetar sinais evidentes que justificassem o comportamento anómalo e justificativo dos deslocamentos observados na monitorização.

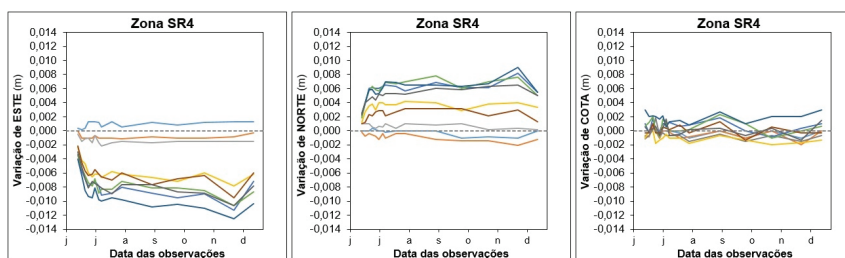


Fig. 5 - Registos das observações na Zona SR4: coordenadas Este, Norte e Cota.

Fig. 5 - Records of observations in Zone SR4: East, North and Elevation coordinates.

No entanto, convém salientar que o talude da SR4, que apresenta uma superfície bastante irregular e descomprimida, denota algumas escorrências de água em zonas de fissuras adjacentes a algumas marcas de observação (fig. 6). A título comparativo, na Fot. 2 ilustra-se o SR4 antes da intervenção. A justificação para tal situação ocorrer está relacionada com a própria geologia do talude.



Fig. 6 - Talude monitorizado da SR4 onde se verificam escorrências de água por fissuras no betão projetado.

Fig. 6 - SR4 slope monitored where water appears from cracks in the shotcrete.

A colocação de betão projetado cria uma barreira impermeável na face do talude, não permitindo a dissipação natural da água, quer pelas fraturas da rocha, quer pela estrutura aberta do clinker. Os drenos existentes não conseguem captar, devido à

elevada heterogeneidade dos materiais, a percolação de água que ocorre nos depósitos piroclásticos pomíticos, permeáveis, a nível superior, criando-se impulsos hidrostáticos motivados pela água e reajustes internos do clinker e dos blocos rochosos, promovendo a deformação do maciço e / ou da camada de betão projetado.

CrITÉRIOS de Alerta e Alarme

De acordo com Pinto de Sousa (2020), os limites de alerta são valores ou taxas de variação que, de acordo com os cenários que fundamentaram a sua definição, podem indicar a ocorrência de situações suscetíveis de afetar a funcionalidade da própria estrutura e das estruturas localizadas na sua zona de influência, a curto prazo, podendo evoluir de modo a colocar em causa a respetiva segurança, com riscos para pessoas e bens. Os limites de alarme são valores ou taxas de variação que implicam uma ação imediata decidida no âmbito das ações de contingência (reforço das condições de segurança, evacuação da zona de risco, entre outras), independentemente da avaliação da situação. Estes valores ou taxas são, obviamente, superiores aos definidos para os limites de alerta.

Na ausência de um plano de monitorização detalhado, que incluísse critérios especiais definidos em fase de projeto e tendo em consideração a tendência evolutiva dos deslocamentos em várias marcas da SR4, foram definidos os critérios de alerta e de alarme.

Uma vez que se desconhecia à priori as condições de estabilidade de todo o maciço, partiu-se da premissa que para serem realizados trabalhos de consolidação do talude, este encontrava-se muito próximo do limiar do seu equilíbrio limite, com um Fator de Segurança igual à unidade ($FS \approx 1,0$).

Assim sendo, numa primeira fase, procedeu-se à verificação das condições de estabilidade para encontrar as condições de equilíbrio com o recurso a um *software* específico (SLIDE, v6.06, da RocScience). Para o efeito, foi utilizado o método das fatias de Morgenstern-Price (Morgenstern-Price, 1965) e considerado o perfil topográfico representativo, com a caracterização litoestratigráfica apresentada no estudo geológico e geotécnico que suportou a obra (fig. 7). Para os materiais terrosos superiores, o modelo de rotura utilizado foi o de Mohr-Coulomb.

Para o material rochoso, foi utilizado o modelo não linear generalizado de Hoek-Brown como critério de rotura.

Nesta fase foi adicionada uma camada de betão projetado de 10 cm, de acordo o projeto de execução, tendo o FS exibido um incremento de 34% relativamente às condições de equilíbrio limite.

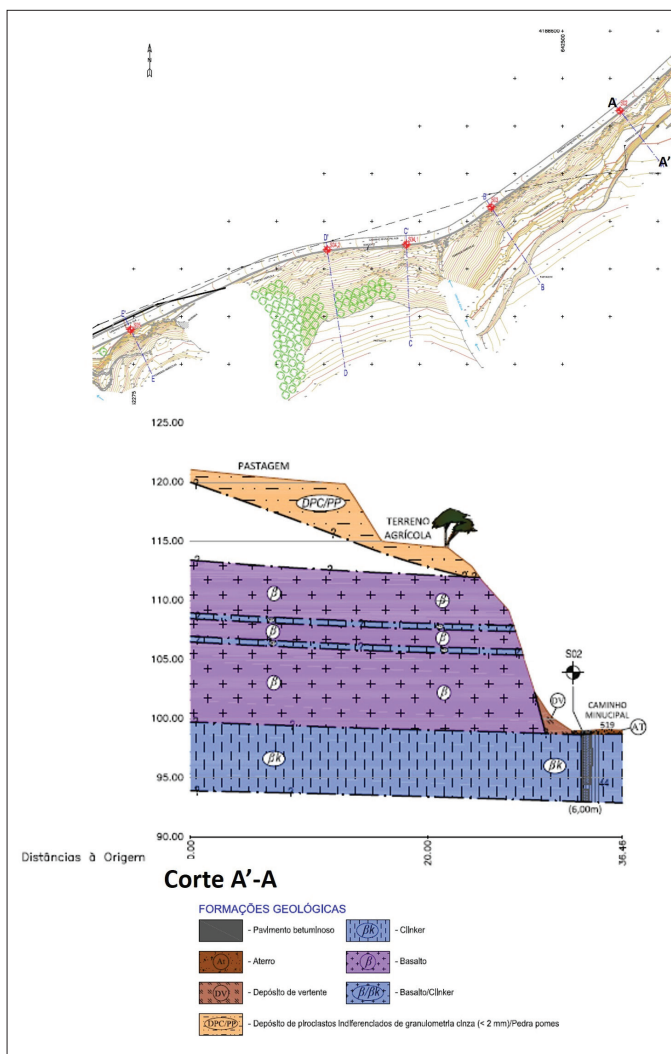


Fig. 7 - Modelo geológico e geotécnico para o setor SR4 (adaptado de Geotrota, 2016).

Fig. 7 - Geological and geotechnical model for the SR4 sector (adapted from Geotrota, 2016).

Numa segunda fase, foram integradas as características geométricas e geológicas do talude, bem como os parâmetros mecânicos dos materiais geológicos e da camada de betão armado num modelo de elementos finitos (RS2, da RocScience). Aplicou-se a técnica de redução da resistência ao corte (TRR) (Matsui e San, 1992) para determinação do fator de segurança do talude revestido por betão projetado.

A localização da superfície de rotura é conseguida pela redução progressiva dos parâmetros de resistência ao corte. A visualização da rotura do talude é verificada através de zonas nas quais a resistência ao corte é insuficiente para resistir às tensões tangenciais. A indicação de rotura considerada no modelo de análise de estabilidade é a de não convergência da solução (Zienkiewicz e Taylor, 1989), quando não ocorre mais mobilização de resistência necessária para se manter o equilíbrio. Neste sentido, a rotura do talude e a não convergência numérica ocorrem simultaneamente e são acompanhadas de um drástico crescimento dos deslocamentos nodais na rede.

Na fig. 8 apresenta-se as deformações máximas de corte para a solução de não convergência tendo em conta as premissas mencionadas anteriormente.

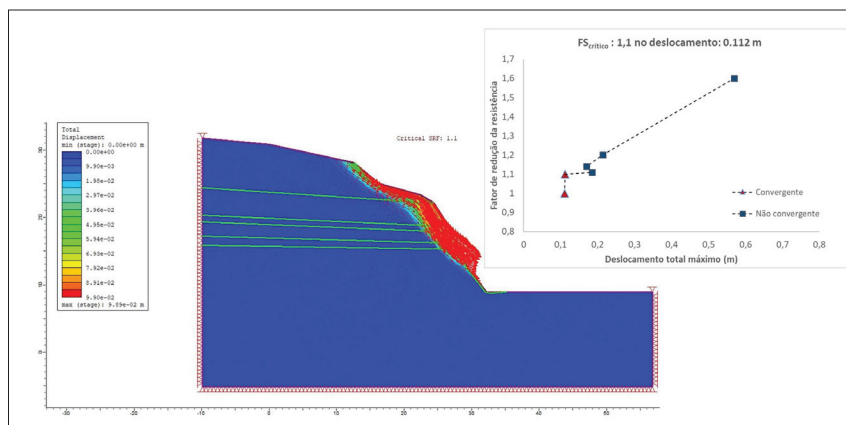


Fig. 8 - Deformações máximas de corte para a solução de não convergência.

Fig. 8 - Maximum shear strains for non-convergence solution.

Para este contexto, o fator de redução da resistência foi de 1,1 no patamar da não convergência do modelo, obtendo-se um deslocamento máximo de 0,112 m.

Foram definidos os seguintes critérios de alerta e alarme para a SR4, tendo como suporte os resultados obtidos:

- Critério de Alerta: deslocamentos obtidos na ordem dos 0,02 m, correspondendo a cerca de 20% do deslocamento máximo admissível;
- Critério de Alarme: deslocamentos obtidos na ordem dos 0,06 m, correspondendo a 50% do deslocamento máximo admissível.

Na TABELA III estão representados os níveis de alerta e alarme, com as respectivas ações de atuação para a sub-rede SR4. As leituras que se encontrem abaixo do nível de alerta não necessitam de qualquer medida de atuação.

TABELA III - Níveis de alerta e alarme, com as respectivas ações, para o talude SR4.

TABLE II - Alert and alarm levels, with the respective actions, for slope SR4..

Nível	Critérios	
	Instrumentação	Ações
Alerta	$60 \text{ mm} > \delta_{\text{total}} \geq 20 \text{ mm}$	- Comunicação através de reports às entidades envolvidas; - Inspeções visuais no terreno; - Aumento da frequência de leitura dos dispositivos instalados.
Alarme	$\delta_{\text{total}} \geq 60 \text{ mm}$	- Comunicação através de reports às entidades envolvidas; - Aumento da frequência de leitura dos dispositivos instalados - Aplicação de medidas de reposição de segurança.
δ_{total} – Deslocamento total		

Até ao momento para este talude (SR4) não foram obtidos deslocamentos totais que atingissem qualquer um destes critérios anteriormente definidos (ver fig. 9). O deslocamento obtido na última campanha (15-12-2022) com um quantitativo de 0,012 m corresponde a cerca de 60% do limite estabelecido como critério de alerta (0,02 m), pelo que não estão previstas, neste momento, quaisquer ações.

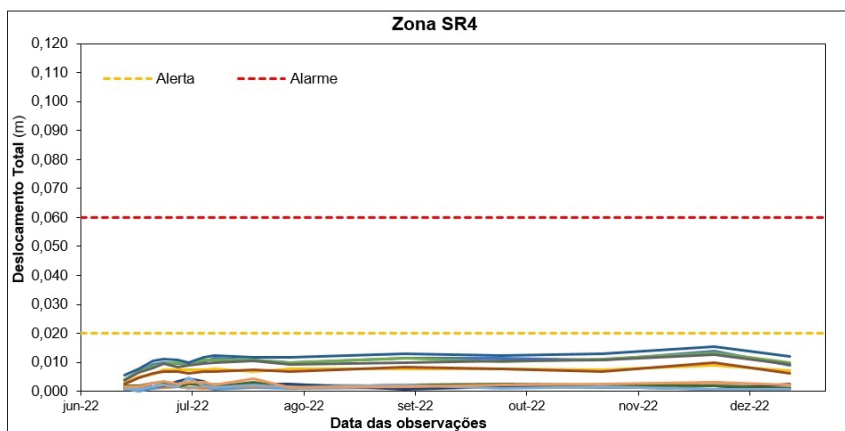


Fig. 9 - Deslocamentos totais observados na sub-rede SR4.

Fig. 9 - Total displacements observed for SR4 sub-network.

Conclusões

Os processos de instabilidade geomorfológica são desencadeados por vários fatores e resultam em elevados custos e perdas de vidas humanas. As vias de comunicação são infraestruturas importantes a nível social e económico nas quais, em muitas situações, é necessário garantir a segurança dos transeuntes, em particular quando estas são desenvolvidas em taludes de escavação potencialmente instáveis.

A avaliação de percussores de atividade através de uma estratégia de monitorização permite, caso sejam estabelecidos critérios de alerta e alarme baseados na modelação numérica da análise de estabilidade, aferir o estado de segurança que o mesmo apresenta e atempadamente tomar medidas corretivas para a sua retificação.

A metodologia utilizada neste trabalho, através da análise de tensão – deformação de um troço do ramal da Lombinha da Maia, permitiu o estabelecimento de níveis de alerta e alarme, que podem ser acompanhados por medições dos deslocamentos medidos por técnicas de monitorização.

Para a definição dos critérios de alerta e alarme foi considerado o cenário depois da intervenção através da construção do modelo geológico e geotécnico apresentado na memória descritiva do relatório utilizado na obra de consolidação dos taludes.

Presentemente, o deslocamento máximo observado, de 0,012 m, já atingiu aproximadamente 60% do critério de alerta.

Esta abordagem pode ser aplicada em taludes naturais e/ou intervencionados, com vista à mitigação do perigo geomorfológico. A validade desta abordagem necessita do conhecimento real das especificidades geotécnicas e implementadas nos locais.

Bibliografia

- Casaca, J., Matos, J. & Baio, M. (2000). *Topografia geral*. Ed. Lidel, 306 p.
- Corominas, J., Moya, J., Ledesma, A., Lloret, A. & Gili, J.A. (2005). Prediction of ground displacements and velocities from groundwater level changes at the Vallcebre landslide (Eastern Pyrenees, Spain). *Landslides, Springer-Verlag, Berlin*: Vol. 2, 83–96.
- Geotrota (2016). *Estudo geológico e geotécnico: Estabilização de um talude de escavação na estrada de ligação entre a Maia e a Lombinha da Maia. Memória Descritiva e Justificativa*. 23 p.
- Matsui, T. & San, K. C. (1992). Finite Element Slope Stability Analysis by Shear Strength Reduction Technique. *Soil Found.* 32, n.º 1: 59-70.
- Morgenstern, N. R. & Price, V. E. (1965). The analysis of the stability of general slip surfaces. *Géotechnique*, 15, 79–93.
- Pinto de Sousa, J. R. (2020). *Estudo e definição de critérios gerais de alerta e de alarme para muros de suporte e taludes rodoviários na sua fase de exploração. Casos de estudo (Tese de Mestrado)*. Instituto superior de Engenharia do Porto. Dep. de Engenharia Geotécnica. 155 p.
- Tomásio, R. & Pinto, A. (2016). Soluções de contenção periférica para ampliação subterrânea do hospital da Luz em Lisboa. *16º Congresso Nacional de Geotecnia*, Açores.
- Uchimura, T., Towhata, I., Wang, L., Nishie, S., Yamaguchi, H., Seko, I. & Qiao, J. (2015). Precaution and early warning of surface failure using tilt sensors. Elsevier. *Soil and Foundations*. 55, 1089-1099.
- Zbyszewski, G., Ferreira, O.V. & Torre de Assunção, C. (1959). *Carta Geológica de Portugal na escala 1:50000. Notícia explicativa da folha A, S. Miguel (Açores)*. Publ. Serv. Geol. de Portugal, 22 p. Lisboa.
- Zbyszewski, G. (1961). *Étude Géologique de L'Ile de S.Miguel (Açores)*. Com. Serv. Geol. Portugal, 45, 5-79.
- Zienkiewicz, O. C. & Taylor, R. L. (1989). *The infinite element method*, Vol. 1, 4th ed. London, New York: McGraw-Hill.

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO CINEMÁTICO
DO MOVIMENTO DE VERTENTE QUE AFETA A
FREGUESIA DA FAJÁZINHA, NA ILHA DAS FLORES**
**KINEMATIC ANALYSIS OF THE BEHAVIOUR OF
THE LANDSLIDE THAT AFFECTS THE PARISH OF
FAJÁZINHA, IN FLORES ISLAND**

Paulo Amaral

Laboratório Regional de Engenharia Civil - Açores (Portugal)
paulo.ap.amaral@azores.gov.pt

André Santos

Laboratório Regional de Engenharia Civil - Açores (Portugal)
andre.a.santos@azores.gov.pt

Ana Maria Malheiro

Laboratório Regional de Engenharia Civil - Açores (Portugal)
ana.mm.malheiro@azores.gov.pt

Filipe Marques

Laboratório Regional de Engenharia Civil - Açores (Portugal)
filipe.mp.marques@azores.gov.pt

Letícia Cunha

Laboratório Regional de Engenharia Civil - Açores (Portugal)
leticia.cm.moniz@azores.gov.pt

Resumo: O presente trabalho tem como área de estudo um movimento de vertente que afeta uma parte significativa da freguesia da Fajázinha, na ilha das Flores (Arquipélago dos Açores). Desde 2018, o processo de instabilidade geomorfológica encontra-se monitorizado por uma rede de monitorização geodésica, constituída por 34 marcas de observação. As medições são realizadas por uma estação total automática Leica TM50 de 0,5”.

São apresentados os resultados obtidos ao longo de 60 meses (janeiro de 2018 a dezembro de 2022). A taxa média de deslocamento na zona instável foi de cerca de -89 mm, 31 mm e -12 mm para as componentes E, N e Z, respetivamente. Os dados obtidos permitem verificar a existência de quatro fases de reativação, uma no início do ano de 2019, duas no decorrer de 2021, e a quarta em dezembro de 2022, todas na sequência da ocorrência de eventos meteorológicos adversos. A instabilidade é confirmada pela morfologia da vertente e fendas de tração observadas na freguesia, pois tem causado danos em moradias e estruturas, uma vez que se trata de elementos vulneráveis, com uma forte exposição, localizados no corpo do deslizamento.

Palavras-chave: Processo de instabilidade, estação total automática, precipitação, Flores.

Abstract: The study area of the present work is a landslide that affects a significant part of the parish of Fajãzinha, on Flores Island (Azores Archipelago). Since 2018, the landslide has been monitored by a geodetic monitoring network. This network consists of 34 observation marks, with measurements taken by a 0.5" Leica TM50 automatic total station. The results obtained over 60 months (from January 2018 to December 2022) are presented. The average displacement rate obtained for the E, N, and Z components was -89 mm, 31 mm and -12 mm, respectively. The time series of the observation marks shows that there were at least four reactivation phases, one at the beginning of 2019, two in 2021 and the last one in December 2022, all following the occurrence of adverse meteorological events. This instability is confirmed by the slope morphology and the traction cracks observed in the parish. Damage has been caused to several houses and other structures there, since they are vulnerable elements with a strong exposure, located in the body of the landslide.

Keywords: Instability process, automatic total station, precipitation, Flores.

Introdução

Os movimentos de vertente constituem o perigo geológico que ocorre com maior frequência no arquipélago dos Açores, em consequência do contexto geológico e morfológico das ilhas vulcânicas, e são a principal causa de danos quer ao nível de estradas, infraestruturas residenciais e industriais, quer ao nível da perda de vidas humanas e feridos (Amaral *et al.*, 2009; Marques *et al.*, 2015).

Apesar do enquadramento tectónico-vulcânico do arquipélago, a precipitação é um dos principais fatores desencadeantes de manifestações de instabilidade geomorfológica, sempre que os seus valores promovem a diminuição da resistência ao corte por decréscimo da coesão aparente, em função da diminuição da sucção em solos não saturados, ou sempre que ocorre a diminuição da resistência ao corte por aumento das pressões neutras ao nível dos planos de rotura potenciais, devido à subida do nível de água (Amaral, 2010, Amaral *et al.*, 2009). Estes dois processos hidrológicos apresentados só constituem condições favoráveis à instabilidade geomorfológica caso atinjam na vertente uma profundidade crítica, determinada pelo declive do terreno e pelos seus parâmetros físicos e mecânicos (van Asch e Buma, 1997; Malet *et al.*, 2005; Corominas *et al.*, 2005).

Neste contexto, a melhor estratégia para a redução dos impactos deste perigo geológico é a sua avaliação e consequente adoção de medidas de prevenção e de mitigação. A primeira fase da prevenção é a identificação e caracterização, que deve ser apoiada por técnicas de monitorização.

Os movimentos de vertente têm uma elevada variabilidade espacial em tipologia (*e.g.*, queda de blocos, deslizamentos, escoadas, etc.), cinemática e geometria (Gili *et al.*, 2000). A previsão da sua aceleração é uma questão crucial para o desenvolvimento de sistemas de alerta e alarme (Corominas *et al.*, 2005).

A deteção e a identificação de precursores de processos de instabilidade geomorfológica (rotura inicial, aceleração da massa em movimento, fluidificação, etc.) requerem a sua observação, de preferência com elevada frequência de aquisição de dados e precisão (Malet *et al.*, 2002).

Os métodos clássicos de monitorização permitem a obtenção de observações em 3D com elevada precisão (geralmente na faixa de alguns milímetros) e aquisição

de dados com elevada frequência (minutos a horas). No entanto, esses métodos fornecem apenas uma medição local (por exemplo, um ponto) da deformação e, portanto, apresentam uma reduzida resolução espacial. Em contrapartida, os métodos de deteção remota fornecem maior resolução espacial (ampla cobertura), embora sejam caracterizados por uma baixa resolução temporal e menor precisão.

As técnicas clássicas com a utilização de estações totais robotizadas (integração de um teodolito e um EDM - Electronic Distance Meter) são consideradas uma técnica de referência na avaliação do deslocamento superficial de movimentos de vertente e estruturas como barragens e pontes (Afeni e Cawood, 2013; Simeoni *et al.*, 2015). Este tipo de sistema possibilita obter uma elevada precisão na determinação 3D (em ordem milimétrica) nas medições entre o ponto de observação e os alvos de monitorização.

A estação total tem sido utilizada na monitorização de movimentos superficiais de áreas instáveis como complemento e alternativa às técnicas geodésicas (*e.g.*, Squarzoni *et al.*, 2005; Puglusi *et al.*, 2005; Amaral, 2005; Artese e Perrelli, 2018).

Uma visão geral da precisão e das vantagens e desvantagens de métodos e instrumentos para medição de deslocamentos em movimentos de vertente pode ser encontrada, por exemplo, em Gili e Corominas (1992) e Amaral (2005).

O presente trabalho tem como área de estudo um movimento de vertente de carácter cinemático lento a muito lento, complexo e profundo, que afeta uma parte significativa da freguesia da Fajázinha, na ilha das Flores (Arquipélago dos Açores).

Este projeto de monitorização é composto por uma rede hidrológica, geotécnica e geodésica. Neste trabalho, o enfoque principal recai na rede de monitorização geodésica iniciada em 2018, cujos principais resultados são apresentados neste capítulo.

Quadro geológico e geomorfológico

A ilha das Flores é um pequeno edifício vulcânico com uma área de cerca de 142 km², localizado a 100 km a oeste da junção tripla dos Açores, onde as placas Americana, Eurasiana e a Africana se juntam. Posiciona-se na placa Americana, no flanco oeste da Crista Média Atlântica, numa região sem registo de sismicidade documental (Azevedo e Portugal Ferreira, 2006).

A ilha das Flores é topograficamente e estratigraficamente assimétrica. Enquanto o flanco leste exibe um declive regular, ocasionalmente dissecado por vales profundos, o flanco oeste apresenta arribas com quebras abruptas, caracterizadas por cicatrizes atribuídas a desabamentos de elevada magnitude (Hildenbrand *et al.*, 2018).

Na ilha das Flores, principalmente na zona central, desenvolve-se um microclima que inclui precipitações superiores a 2000 mm/ano, e o desenvolvimento de uma espessa e frequente cobertura de nuvens e nevoeiros que aumenta a precipitação oculta e diminui a evapotranspiração (Azevedo, 1998). Caracteriza-se por um clima húmido, onde a temperatura varia entre os 13° e os 25°, e as chuvas concentram-se essencialmente entre outubro e abril.

Tal como foi mencionado anteriormente, o presente trabalho tem como área de estudo um movimento de vertente que afeta uma parte significativa do núcleo urbano da Fajázinha, na ilha das Flores (fig. 1). A freguesia da Fajázinha é constituída por um pequeno conjunto de casas (algumas dezenas), com o seu núcleo situado junto à igreja e várias casas dispersas. O acesso a esta freguesia faz-se pela estrada principal que liga Lajes/Santa Cruz à Fajã Grande.

A Fajázinha situa-se numa plataforma detrítica, com declives que variam entre os 7° e os 20°. É delimitada por imponentes escarpas, com declives subverticais, por vezes com alturas superiores a 200 m. A forma em U destas escarpas está associada a mega deslizamentos ocorridos no edifício do vulcão.

O deslizamento da Fajázinha é uma reativação de parte dos depósitos detríticos mobilizados nos referidos mega processos de instabilidade.

O relevo apresenta-se em degraus sendo visíveis fendas de tração e fendas em *echelon*. Em muros e habitações encontram-se várias patologias associadas à movimentação do subsolo com fendas e fissuras diagonais e longitudinais, bem como inclinações de fachadas e por vezes distorção do corpo de casas.

Do ponto de vista geológico (fig. 1c), a área de estudo inclui uma sequência de produtos vulcânicos muito diversificados, desde depósitos do Complexo de Base (escoadas lávicas e tufos/brechas extremamente alterados) e depósitos do Complexo Superior (escoadas lávicas e piroclastos basálticos) até produtos detríticos resultantes da atividade hidrogeomorfológica ao nível da plataforma (Azevedo, 1998).

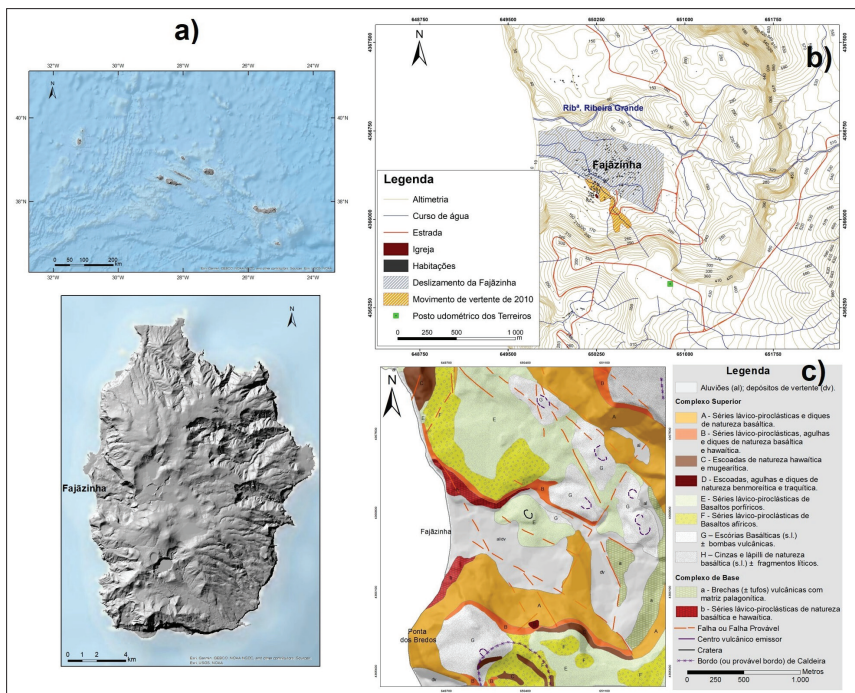


Fig. 1 - Localização geográfica do arquipélago dos Açores a); freguesia da Fajázinha com a identificação do deslizamento da Fajázinha b); mapa geológico da Fajázinha c)
(Fonte: adaptado de Azevedo, 1998).

Fig. 1 - Geographical location of Azores archipelago a); Fajázinha parish with the landslide boundary b); geological sketch of Fajázinha c)
(Source: adapted from Azevedo, 1998).

Em 2010 ocorreu um deslizamento de terra rápido no flanco sul da escarpa que limita a zona habitacional da Fajázinha. Este deslizamento de terra afetou uma parte significativa das habitações próximas da igreja, tendo resultado na evacuação dos moradores por várias semanas.

Em 1991 e 2019, foram realizadas sondagens geotécnicas pela EDA (Empresa de Electricidade dos Açores) para determinar as condições geológicas e geotécnicas para apoio a um projeto de energia hidroelétrica. Foram efetuados dez furos, com profundidades entre os 15 e os 35 m e que incidiram em grande parte junto ao flanco direito do deslizamento de terra. O trabalho foi complementado por ensaios geofísicos (refração sísmica, método MASW).

Ao abrigo do projeto AZMONIRISK.I foram instaladas calhas inclinométricas em 3 locais distintos a profundidades aproximadas de 40 m para medição da deformação em profundidade e deteção dos planos de rotura. Complementarmente, foram ainda instalados piezómetros de corda vibrante nos mesmos locais das calhas inclinométricas e 6 piezómetros de Casagrande.

A exploração da sub-superfície na área de estudo mostrou a existência de depósitos de vertente constituídos essencialmente por areias argilosas castanhas com mistura de blocos rochosos de natureza basáltica. A espessura deste material situa-se entre os 22 e os 30 m. Abaixo dos depósitos de vertente ocorrem escoadas lávicas basálticas (*s.l.*), com diferentes graus de alteração (W3 - W5) (ISRM, 1978). O nível freático foi encontrado entre os 12 m e os 21 m de profundidade.

O processo geomorfológico corresponde a um deslizamento complexo, segundo a classificação de Cruden e Varnes (1996), com uma superfície de rotura profunda e ainda desconhecida. Os levantamentos geotécnicos e ensaios geofísicos realizados recentemente pela EDA (Acorgeo, 2019) e ao abrigo do projeto AZMONIRISK.I, permitem inferir que a profundidade da superfície de rotura se localiza na zona de contacto dos depósitos de vertente com as escoadas lávicas basálticas (*s.l.*) classificadas como medianamente alteradas (W3) a decompostas (W5).

O deslizamento da Fajãzinha apresenta um comprimento de 1100 m, desde a escarpa principal até ao pé, com uma largura que varia entre os 510 m na sua parte superior e os 220 m na sua parte inferior. A diferença de elevação entre o pé e a crista é de cerca de 180 m. A instabilidade geomorfológica cobre uma área de aproximadamente 0,45 km².

Vários indicadores geomorfológicos são identificados na área por meio de fotos aéreas e observação de campo, como a presença de um relevo em degraus, presença de formas côncavas e convexas, cicatrizes secundárias e principais, fendas de tração com desligamento horizontal e vertical, entre outros.

Do ponto de vista geomorfológico, são reconhecidas duas escarpas secundárias e uma escarpa principal, que permitem individualizar o corpo da instabilidade em 3 unidades (fig. 2): a inferior, a intermédia e a superior. Na unidade inferior existe uma escarpa secundária com cerca de 15 m de altura. Em 2013, esta unidade foi reativada, através do desenvolvimento de uma grande fenda de tração, com quase

350 m de extensão. A fenda de tração em alguns setores apresentou uma abertura de 0,2 m e um rejeito vertical de 0,4 m.

Na unidade intermédia observa-se outra escarpa secundária, embora mais difusa devido às atividades antrópicas, mas em alguns setores pode observar-se um desnível topográfico de cerca de 10 m na parte central do corpo do deslizamento. Na base desta escarpa observam-se casas inclinadas. Na unidade superior observa-se uma escarpa com um desnível em torno dos 40 a 50 m. A presença de fendas de tração é visível na estrada de acesso, paralela à escarpa.

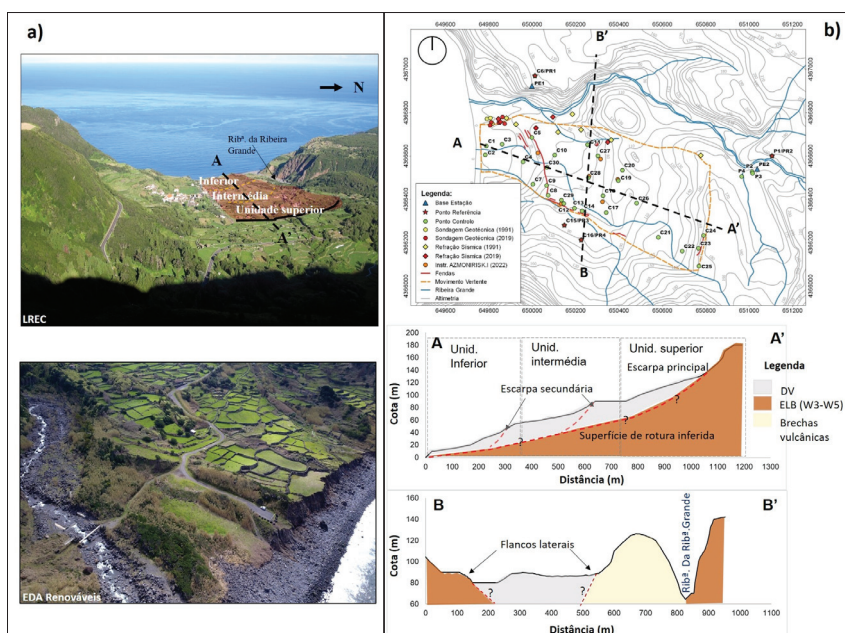


Fig. 2 - Vista geral do deslizamento da Fajãzinha e do pé. O movimento de vertente é ladeado a norte pelo curso de água da Ribeira Grande e a oeste pelo mar a); rede de monitorização e perfis geológicos longitudinais e transversais com a superfície de rotura inferida b).

Fig. 2 - General view of Fajãzinha landslide and toe. The landslide is bordered to the north by Ribeira Grande torrent and to the west by the sea a); monitoring network, and longitudinal and transverse slope geological profiles with inferred slip surface b).

Uma boa evidência da atividade cinemática do deslizamento da Fajãzinha ocorreu no ano hidrológico de 2012-2013, quando foram identificados vários

indicadores de atividade geomorfológica recente, expressos nas estradas e habitações (e.g., fendas no solo, fissuras diagonais e longitudinais em paredes de alvenaria, estruturas inclinadas com fissuras, etc. (fot. 1).

Ao longo da escarpa que circunda a zona da Fajázinha são visíveis diversas quedas de água que escoam as águas provenientes de um planalto existente na parte superior daquela escarpa. Parte destas águas infiltra-se diretamente no terreno (na base da escarpa) e a remanescente é drenada através de linhas de água que se desenvolvem para oeste, no sentido da orla costeira, sendo de destacar entre elas a mais expressiva (pelo seu caudal líquido e sólido), a denominada “Ribeira Grande”, considerada a maior linha de água dos Açores.

A zona do pé da instabilidade geomorfológica corresponde à arriba, onde é possível observar a natureza geológica do material e a presença de várias nascentes.



Fot 1 - Exemplos de fendas em estradas, casas e muros, resultantes da deformação do terreno (Fotografias de LREC - Açores, tirada a 13/11/2013).

***Photo 1** - Examples of ground cracks and fissures in houses, and walls, resulting from the slope deformation (Photographs by LREC - Azores taken on 13/11/2013).*

Rede de monitorização geodésica

A estação total é um dos equipamentos de eleição para a monitorização dos movimentos de vertente no arquipélago dos Açores, devido à precisão, rapidez de processamento dos dados e facilidade de aplicação (Amaral *et al.*, 2007). Consiste num equipamento que combina a medição de ângulos horizontais e verticais e distâncias inclinadas, com precisão milimétrica a submilimétrica, dependendo do modelo do equipamento utilizado.

Com esse tipo de equipamento é possível medir a posição de marcas fixas (fixadas no solo com betão armado ou em afloramentos rochosos) para determinar a direção e a velocidade da área instabilizada em três dimensões, com precisão milimétrica.

A rede de monitorização da Fajãzinha é composta por 33 marcas de observação. As observações são realizadas através de uma estação total automática Leica TM50 de 0,5", com precisão para distâncias de 0,6 mm + 1ppmm, que incorpora tecnologia ATR (Automatic Target Recognition) até 3 km.

A fig. 2b mostra a identificação e distribuição espacial dos pontos de monitorização. A rede de monitorização consiste em duas estações base (PE1 e PE2), 30 pontos de controle (C1 a C30) e quatro pontos de referência (C6/PR1, P1/PR2, C15/PR3 e C16/PR4). Todos os pontos de controle e referência são equipados com prismas Leica GPR112, exceto o ponto de referência PR1, que é equipado com um prisma GMP104. A rede de monitorização estende-se para fora dos limites da área instável, numa zona onde a estrada regional apresenta fendas de tração, sendo ainda desconhecida a relação destas com o deslizamento da Fajãzinha. Para avaliação cinemática deste setor, o PE2 permite a observação para os pontos P1 a P4. No entanto, neste trabalho os resultados incidirão apenas sobre o deslizamento de terra da Fajãzinha.

As re-observações são obtidas com uma cadência quinzenal pelos Serviços de Ambiente da ilha das Flores (SAF).

Em cada campanha de medição, todas as observações foram realizadas num único dia. Para cada marca são realizados pelo menos 7 giros independentes. Em cada estacionamento são adicionados parâmetros metrológicos (pressão, temperatura e humidade) para correção de efeitos da refração atmosférica nas leituras efetuadas.

A distância inclinada (DI) entre os pontos estação e os restantes pontos de observação varia entre os 48 e 1137 m, consoante o ponto considerado.

O erro da distância medida para um intervalo de confiança de 95%, foi calculado a partir da parte constante da precisão do equipamento (0,6 mm) e da parte variável da precisão com base na distância medida (1 ppm). O erro da distância variou entre os 1 mm e os 3 mm, tendo em consideração as distâncias entre o ponto estação e as marcas de observação, o que revela uma excelente qualidade das grandezas observadas, no caso de existirem condições ótimas de observação. Naturalmente que esta qualidade pode ser degradada em função das condições ambientais vigentes na altura das observações.

O Ponto Estação (PE1) onde são efetuadas as observações com a estação total automática localiza-se numa área geológica relativamente estável, composta por uma sequência de escoadas lávicas de natureza basáltica.

A rede de monitorização geodésica foi instalada em novembro de 2017. Os dados apresentados neste documento abrangem o período compreendido entre janeiro de 2018 e dezembro de 2022. Durante este período, foram realizadas 102 campanhas de recolha de dados ($\approx 2/\text{mês}$) para acompanhar a evolução dos deslocamentos.

Resultados obtidos

O equipamento utilizado na rede de monitorização geodésica mede ângulos (horizontais e verticais) e distâncias inclinadas. A partir destas grandezas, são determinadas as coordenadas retangulares E (este), N (norte) e Z (altimetria), implementadas no sistema de referência PTR 08 UTM, zona 25 N. Tendo em consideração que a componente da distância inclinada apresenta um elevado rigor e precisão, sendo uma grandeza medida diretamente, a análise aos dados irá ser efetuada a partir desta.

Apresenta-se na fig. 3 a série temporal da distância inclinada para algumas das marcas de observação do setor inferior (C1 e C3), do intermédio (C11 e C27) e do superior (C22 e C25), representativas da área de estudo. A precipitação diária e acumulada obtida na estação pluviométrica dos Terreiros, localizada perto da freguesia da Fajázinha (≈ 1 km), é também apresentada.

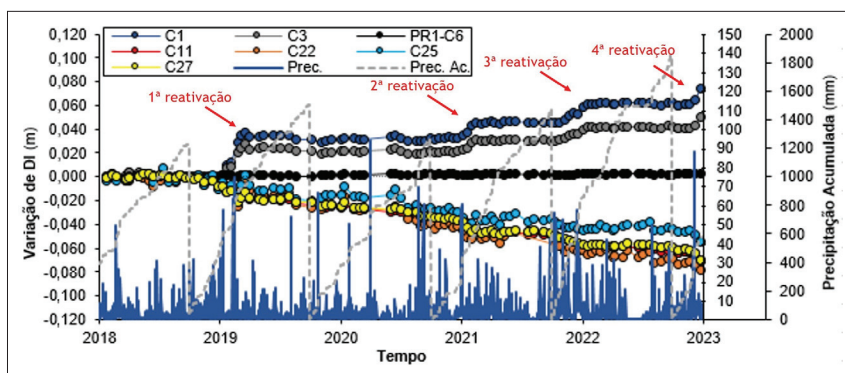


Fig. 3 - Série temporal para a distância inclinada (DI) e quantificação da precipitação para alguns pontos desde o início das observações até ao final do ano civil de 2022.

Fig. 3 - Time series for slope distance (DI) and quantification of precipitation for some points from the start of observations until the end of the 2022 calendar year.

Entre janeiro e dezembro de 2018 as oscilações foram insignificantes, permitindo definir um referencial para o sistema em observação em função de possíveis variações futuras. Após este período de tempo, e até março de 2019, ocorreu um aumento significativo nas variações de deslocamento, através da alteração brusca do declive da linha de tendência do DI, sugerindo a reativação do sistema. A taxa de variação aumentou rapidamente em quase 40 mm em vários pontos, enquanto outros, localizados fora da zona instável se mantiveram sem deslocamento (C6/PR1, C15/PR3 e C16/PR4).

Os meses de dezembro de 2018 a fevereiro de 2019 foram particularmente chuvosos. No ano hidrológico de 2017/2018, a precipitação anual acumulada foi de cerca de 1150 mm. No ano hidrológico de 2018/2019, entre dezembro de 2018 e fevereiro de 2019, choveu cerca de metade (620 mm) da precipitação acumulada em todo o ano hidrológico anterior, sendo esta a razão pela qual o deslizamento de terra que afeta a Fajázinha foi reativado. De referir ainda que durante este mesmo período chuvoso (dezembro de 2018 a fevereiro de 2019), ocorreram três dias distintos onde se registaram valores de precipitação entre os 50 e os 75 mm.

Pela análise da série temporal, são reconhecidas no total quatro fases de reativação: a já mencionada que decorreu no início do ano 2019, duas no decorrer

de 2021, e a última em dezembro de 2022, todas na sequência da ocorrência de eventos meteorológicos adversos.

Um dado interessante é que as marcas localizadas na unidade inferior denotam em cada fase reativa uma variação brusca do deslocamento, seguido de uma estabilização temporária. Para as restantes marcas localizadas no setor intermédio e superior, verifica-se um comportamento distinto do verificado no setor inferior, isto é, entre as reativações ocorre sempre uma fase de evolução com declive suave e praticamente constante do parâmetro DI, fazendo com que os incrementos de declive deste mesmo parâmetro na fase de reativação não sejam tão pronunciados.

A explicação para esta evidência prende-se com a movimentação desta instabilidade geomorfológica por blocos. O setor inferior é o primeiro a reativar e a partir daí, ocorre um mecanismo de transferência de massa a partir da massa deslocada dos blocos superiores para o bloco inferior, até ocorrer novamente um reequilíbrio da massa instável, e assim sucessivamente.

Tendo em consideração as coordenadas 3D do sistema, o deslocamento médio observado no período de monitorização apresentou valores em torno de -89 mm, 31 mm e -12 mm para os componentes E, N e Z, respetivamente.

A orientação do deslocamento planimétrico é compatível com o sentido preferencial da movimentação do terreno, essencialmente para oeste. Para entender os movimentos em planimetria, projeta-se na fig. 4 os vetores de deslocamento planimétrico médio obtidos no final de dezembro de 2022 e que dão uma visão global das taxas de deformação.

A velocidade planimétrica anual média é de cerca de 19 ± 4 mm/ano, o que permite classificá-lo como um movimento de vertente muito lento a lento.

O campo de deslocamento é muito heterogéneo no tempo e no espaço, mas exhibe semelhanças nas diferentes unidades geomorfológicas. A zona do pé (parte inferior) é identificada como o setor mais ativo do deslizamento e é dominada por processos de tração. Uma diminuição nas taxas de deslocamento é observada da base para o topo do deslizamento. Relativamente à componente altimétrica, apesar da insuficiente resolução espacial dos pontos de monitorização, a sul da escarpa principal verifica-se uma incipiente zona de compressão, consistente com um processo de abatimento ativo (fig. 5).

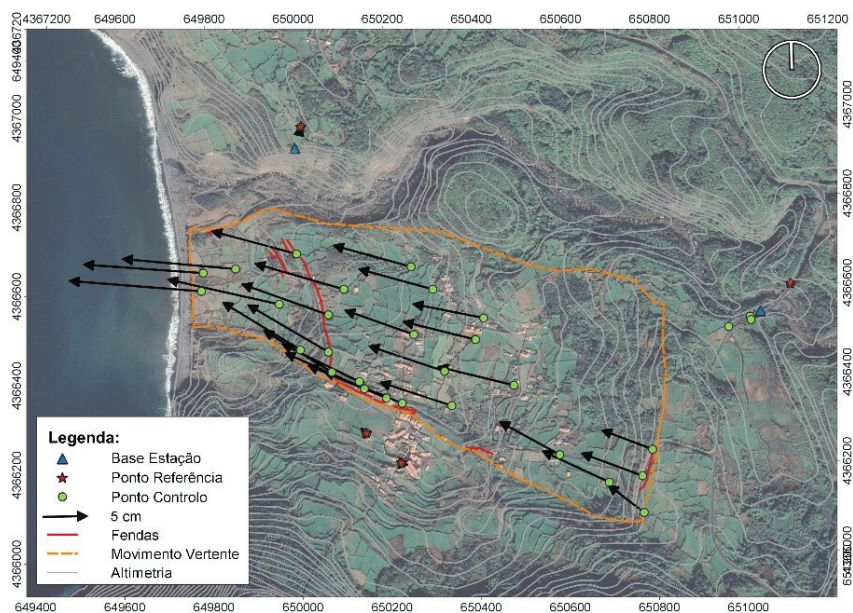


Fig. 4 - Comportamento cinemático durante o período de monitorização (29-12-2022).

Fig. 4 - Kinematic behaviour of the landslide during the monitoring period (average value).

O movimento de vertente mostra uma resposta errática e complexa devido à complexidade do sistema face à precipitação (por exemplo, anisotropia de pequena e grande escala em termos de permeabilidade e presença de caminhos preferenciais de circulação de água devido à presença de fendas de tração. Uma avaliação quantitativa do tempo de resposta dos deslocamentos com a precipitação varia para o caso em estudo entre 10 a 50 dias a reativar.

Considerações finais

O deslocamento de um movimento de vertente é um processo complexo e depende de muitos fatores. Em zonas propensas à ocorrência de deslizamentos, a gestão da perigosidade tem sido orientada principalmente no sentido de se evitar o desenvolvimento de atividades e/ou o emprego de medidas estabilizadores/corretivas de taludes potencialmente instáveis.

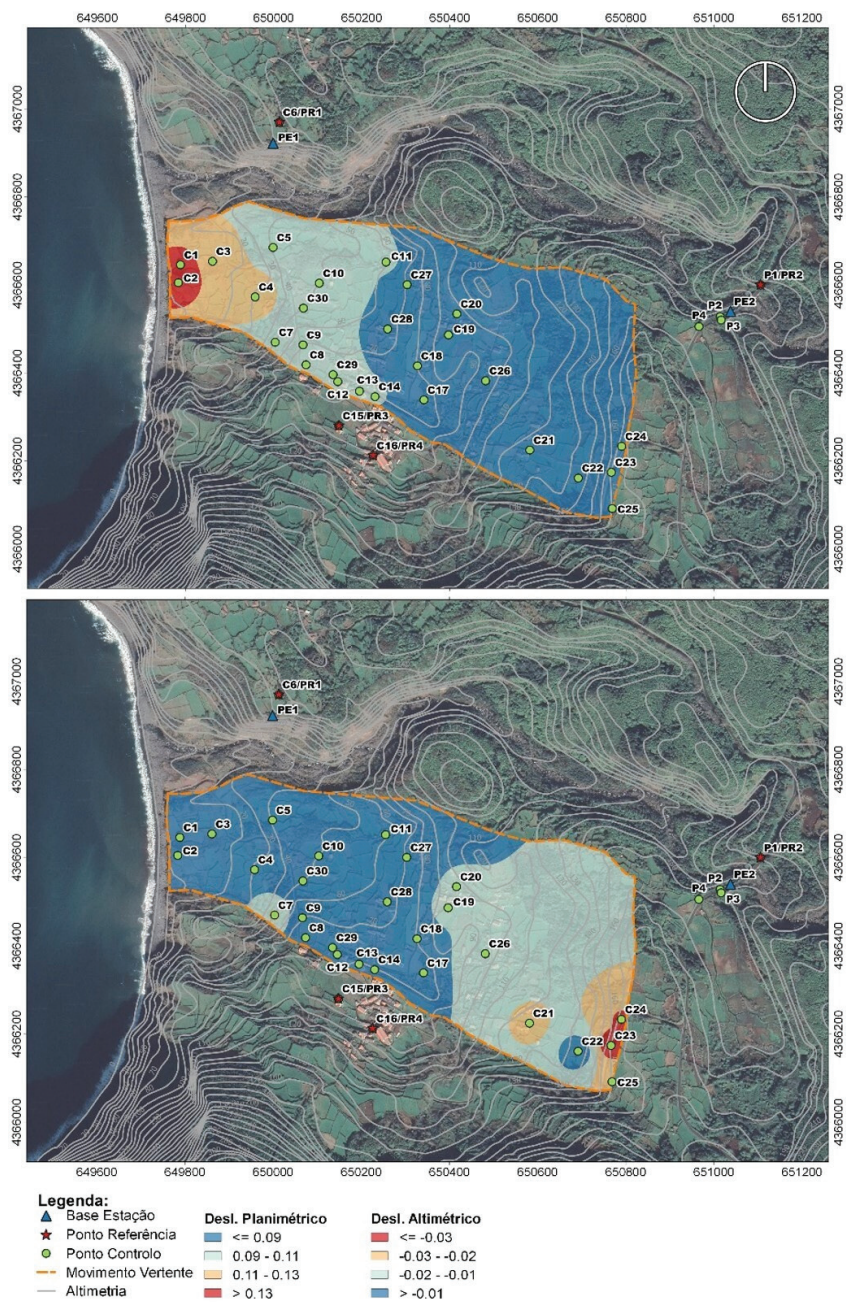


Fig. 5 - Representação em planimetria e altimetria dos resultados (interpolação IDW).

Fig. 5 - Planimetric and altimetric representation of the results in interpolation form..

No entanto, em algumas situações, como é o caso apresentado neste trabalho, a tipologia e a dimensão do fenómeno de instabilidade geomorfológica não permitem a execução de obras de remediação, devido ao seu elevado custo e/ou elevado impacto ambiental.

A medição dos deslocamentos verificados à superfície é uma forma simples e direta de avaliar a evolução do processo de instabilidade e analisar o comportamento cinemático, em resposta a condições meteorológicas adversas.

A capacidade de prever acelerações e o comportamento de longo prazo de deslizamentos lentos é um requisito crucial no processo de gestão de riscos e, em particular, na definição de sistemas de alerta e alarme precoce.

Este tipo de projeto só faz sentido com a aplicação multidisciplinar de várias técnicas para obtenção de elevada informação espacial e temporal. A monitorização com recurso a uma estação total permite dar uma ideia do padrão de deformação que ocorre, embora com baixa resolução temporal. A rede de monitorização permite verificar se o movimento ocorreu desde a última medição, mas não fornece informações sobre o espaço de tempo que decorre entre duas campanhas de aquisição de dados.

Durante 4 anos de monitorização, o deslizamento da Fajázinha apresentou alterações de velocidade em resposta à precipitação. Uma reativação notável do sistema ocorreu entre dezembro de 2018 e fevereiro de 2019. Nesse período, foi possível observar um atraso de 10 a 50 dias entre os picos de chuva e o incremento da velocidade de pico.

Nesse contexto, a reativação do deslizamento da Fajázinha é um processo complexo, ligado a processos morfológicos, hidrológicos e às propriedades físico-mecânicas do solo.

Este trabalho apresenta o primeiro estudo do deslizamento de terra da Fajázinha.

Como trabalhos futuros, serão desenvolvidas análises estatísticas para estabelecer o tempo de resposta, caso existam, entre os deslocamentos superficiais e os eventos meteorológicos, através da aplicação de funções de correlação cruzada por forma a providenciar informação útil para prever a ocorrência de novas reativações.

Bibliografia

- Acorgeo (2019). *Estudo geológico e geotécnico. Aproveitamento Hidroelétrico da Ribeira Grande - Flores, Açores. Relatório Final. Memória descritiva e justificativa*. Versão 3. 21 p.
- Amaral, P. (2005). *Monitorização de vertentes instáveis no concelho da Povoação, ilha de S. Miguel (Açores): ensaios com base na utilização de uma estação total (Tese de Mestrado em Vulcanologia e Riscos Geológicos)*. Universidade dos Açores. 147 p.
- Amaral, P. (2010). *Caracterização geotécnica e hidrológica de depósitos vulcânicos: Modelação da estabilidade de taludes no concelho da Povoação (ilha de S. Miguel – Açores) (Dissertação de Doutoramento em Geologia especialidade de Vulcanologia)*. Departamento de Geociências da Universidade dos Açores, 277 p.
- Amaral, P., Zêzere, J. L., Marques, R., Trota, A., Rodrigues, R. & Gaspar, J. L. (2007). A aplicação de uma estação total automática na detecção e acompanhamento de fenómenos de instabilidade geomorfológica no Concelho da Povoação (S. Miguel, Açores). *Publicações da Associação Portuguesa de Geomorfólogos*, Vol. V, p. 67-74.
- Amaral, P., Marques, R., Zêzere, J. L., Queiroz, G. & Marques, F. (2009). Distributed transient modelling of rainfall triggered shallow landslides for susceptibility assessment in Ribeira Quente valley (S. Miguel, Azores), In: *Landslide Processes, from geomorphological mapping to dynamic modelling*, Strasbourg, France 6-7 February 2009. Strasbourg, CERG, France: p. 29-94.
- Afeni, T. B. & Cawood, F. T. (2013). Slope Monitoring using Total Station: What are the Challenges and How Should These be Mitigated? *S. Afr. J. Geomat.*, 2, 41–53.
- Artese, S. & Perrelli, M. (2018). Monitoring a landslide with high accuracy by total station: A DTM-based model to correct for the atmospheric effects. *Geosciences*, 8, p. 2-23.
DOI: <https://doi.org/10.3390/geosciences8020046>
- Azevedo, J. M. (1998.) *Geologia e Hidrologia da ilha das Flores (Açores – Portugal) (Tese de Doutoramento)*. Departamento de Ciências da Terra. Universidade de Coimbra, 257 p.
- Azevedo, J. M. & Portugal Ferreira, M. (2006). The volcanotectonic evolution of Flores Island, Azores (Portugal). *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 156, 90-102.
- Corominas, J., Moya, J., Ledesma, A., Lloret, A. & Gili, J. (2005). Prediction of ground displacements and velocities from groundwater level changes at the Vallcebre landslide (Eastern Pyrenees, Spain). *Landslides, Springer-Verlag, Berlin*: Vol. 2: 83–96.
- Cruden, D. & Varnes, D. (1996). Landslide Types and Processes, edited by Turner, A. K. and Schuster, R. L., Landslides. Investigation and Mitigation. *Transportation Research Board, Special Report 247*, National Academy Press, Washington D.C., 36–75.
- Gili, J.A. & Corominas, J. (1992). Aplicación de técnicas fotogramétricas y topográficas en la auscultation de algunos deslizamientos. *III Simpósio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables*, La Coruña, vol. 3, 941 -952.
- Gili, J. A., Corominas, J. & Rius, J. (2000). Using Global Positioning System techniques in landslide monitoring. *Engineering Geology*, 55, 167–192.
- Hildenbrand, A., Marques, F. & Catalão, J. (2018). Large-scale mass wasting on small volcanic islands revealed by study of Flores Island Azores). *Scientific Reports*. 8:13898. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-32253-0>
- ISRM - INTERNATIONAL SOCIETY OF ROCK MECHANICS (1978). Methods for the quantitative description of rock masses and discontinuities. *Int. J. Rock Mech. Miner. Sci. Geomech. Abstr.* 15, 319-368.
- Malet, J-P., van Asch, T.W., van Beek, R. & Maquaire, O. (2005). Forecasting the behaviour of complex landslides with a spatially distributed hydrological model. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 5, 71-85.

- Marques, R., Amaral, P., Araújo, I., Gaspar, J.L. & Zêzere, J.L. (2015). Landslides in S. Miguel Island (Azores): susceptibility analysis and validation of rupture zones using a bivariate GIS-based statistical approach. Eds. Gaspar, J. L., Guest, J. E., Ducan, A. M., Barriga, F. J. A. & Chester, D. *Volcanic Geology of São Miguel island (Azores Archipelago)*. Geological Society, London, *Memoirs*, 44, 167-184.
- Puglisi, G., Bonaccorso, A., Mattia, M., Aloisi, M., Benforte, A., Campisi, O., Cantarero, M., Falzone, G., Puglisi, B. & Rossi, M. (2005). New Integrated Geodetic Monitoring System at Stromboli Volcano (Italy). *Eng. Geol.*, 79, 13-31.
- Simeoni, L., Ferro, E. & Tombolato, S. (2015). Reliability of Field Measurements of Displacements in Two Cases of Viaduct-Extremely Slow Landslide Interactions. *Eng. Geol. Soc. Territ.*, 2, 125-128.
- Squarzonni, C., Delacourt, C. & Allemand, P. (2005). Differential single-frequency GPS monitoring of La Valette Landslide (French Alps). *Eng. Geol.*, 79, 215-229.
- van Asch, T. J. & Buma, J.T. (1997). Modelling groundwater fluctuations and the frequency of movement of a landslide in the Terres Noires of Barcelonnette (France). *Earth Surf Proc. Landforms*, 22, 131-141.
- Burland, J. B. (1995). Piles as settlement reducers. *Proceedings of 19th National Italian Geotechnical Conference*. Pavia, Italy, 21-34.

**CONTRIBUIÇÃO NA INTERPRETAÇÃO FÍSICA
DE UM LEITO FLUIDIZADO COMO RISCO DE
MOVIMENTO DE AREIAS.**

EXEMPLOS DE ESTUDOS DE CASO
CONTRIBUTION IN THE PHYSICAL
INTERPRETATION OF A FLUIDIZED BED
AS RISK OF SAND MOVEMENT.
EXAMPLES OF CASE STUDIES

Mário Talaia

Universidade de Aveiro, CIDTFF (Portugal)
Centro de Investigação Didática e Tecnologia na Formação de Formadores
ORCID: 0000-0003-4311-6209 mart@ua.pt

Resumo: Um leito de areia, geralmente, é constituído por uma camada de partículas sólidas através do qual é atravessado por um caudal de gás ou de um líquido, podendo inicialmente ser considerado um leito fixo e com a passagem do fluido serem criadas condições de fluidização. É com a velocidade mínima de fluidização que o leito se transforma em fluido e um excesso de fluido resulta na passagem errática de bolhas. O movimento de partículas sólidas a partir de um leito fluidizado permite interpretar o movimento de massas de terra ou pequenas rochas em vertentes como um risco geomorfológico. Na natureza há fatores que potenciam o seu movimento, bem como o seu poder destrutivo influenciado por intensa precipitação.

Neste estudo são apresentados exemplos realizados em laboratório em que se mostra o comportamento de um leito fixo a leito fluidizado

usando uma corrente de ar, o movimento de areias através da força de corte a partir de uma corrente gasosa, leis físicas e imagens para escoamento de duas fases que permitem interpretar fisicamente o deslizamento de massas de terra devido a inundações como resultado de eventuais riscos para pessoas, economia e infraestruturas.

Palavras-chave: Escoamentos de duas fases, deslizamento de terra, movimento de partículas, força de arrasto, educação para o risco.

Abstract: A bed of sand is usually composed of a layer of solid particles through which it is crossed by a gas or a liquid flow, and can initially be considered a fixed bed and with the passage of fluid fluidization conditions are created. It is with the minimum fluidization speed that the bed becomes fluid and an excess of fluid results in the erratic passage of bubbles. The movement of solid particles from a fluidized bed allows interpretation of the movement of land masses or small rocks on slopes as a geomorphological risk. In nature there are factors that boost their movement, as well as their destructive power influenced by intense precipitation.

This study presents examples carried out in a laboratory showing the behaviour of a bed fixed to a fluidized bed using a current of air, the movement of sands due to the cutting force from a gas stream, physical laws and images for two-phase runoff which make it possible to physically interpret landslides due to flooding as a result of possible risks to people, the economy and infrastructure.

Keywords: Two-phase flows, landslide, particle movement, drag force, risk education.

Introdução

Com a problemática das alterações climáticas através do aquecimento global e cenários de novos ecossistemas (IPCC, 2020), a sustentabilidade de regiões a diferentes latitudes e longitudes está a ser alterada impondo novas visões aos decisores de planeamento, económicos, financeiros e políticos.

Na natureza há fatores que potenciam o deslizamento de massas de terra ou pequenas rochas em vertentes como um risco geomorfológico. Uma precipitação persistente e durante algum tempo pode favorecer o movimento de pequenas e grandes massas de terra e de rochas de diferentes dimensões. É a água registada num udografo ou num sensor de aquisição de dados, em mm ou L/m^2 , que permite conhecer a quantidade de água registada no tempo.

Com base na experimentação em laboratório a partir de um leito fluidizado de partículas sólidas é possível observar e interpretar o movimento de partículas sólidas quando se usa como caudal um fluido, gás ou líquido. A massa volúmica do fluido é determinante para a intensidade da força de corte que arrasta as partículas, sendo de cerca de 1:1000 quando se usa ar em face de água, potenciando na natureza um poder destrutivo que é condicionado pela influência da coluna de água por m^2 devida à precipitação.

A presença da água pode provocar uma diminuição da estabilidade ou da resistência à tensão de corte da massa de terra ou pequenas rochas, quer em solos saturados ou quer em solos não saturados. A avaliação dos riscos de movimentos sugere um aumento da pressão da água na porosidade do leito e condiciona a profundidade do plano de sustentação ou instabilidade que provoca a rotura e início de deslizamento.

Neste trabalho, a partir de experimentação realizada em laboratório, mostra-se o comportamento de um leito fixo a leito fluidizado usando uma corrente de ar, a determinação da velocidade mínima de fluidização e a influência da pressão no fluido face à velocidade mínima de fluidização. Um excesso de caudal de ar, acima do caudal mínimo para garantir a fluidização, é usado para compreender o comportamento das partículas. Mostra-se o comportamento de uma corrente gasosa a movimentar grãos de areia na formação de dunas na Costa Nova, zona Litoral de Portugal Continental e

a avaliação da tensão de corte mínima para se dar início à movimentação das partículas sólidas. Mostra-se, ainda, a interpretação física de diferentes imagens de deslizamento de terras ou pequenas rochas devido a inundações.

Fundamentos teóricos

Fluidos: ar húmido e água na educação para o risco

Na meteorologia, assume-se que o “ar” é constituído apenas por dois gases perfeitos ou ideais, ou seja, por ar seco e vapor de água, sendo, o conjunto, designado por ar húmido. Enquanto o ar seco é uma mistura em proporções fixas de diversos gases (N_2 , O_2 , Ar, etc.), a existência do vapor de água, na atmosfera, é considerada variável (Iribarne e Cho, 1980; Ahrens, 2012; Salby, 1995).

O ar húmido condiciona a vida, em geral, na Terra e do ser humano, em particular, em qualquer cenário. O ser humano usa o ar húmido no seu ato de respirar, de forma involuntária e inconsciente, com uma pressão parcial do oxigénio capaz de realizar trocas gasosas na circulação pulmonar ou pequena circulação. Para cálculos à superfície da terra pode-se considerar que o ar está sujeito a uma pressão absoluta de cerca de 1000hPa, uma pressão parcial de oxigénio de cerca de 150mmHg, uma massa volúmica de cerca de $1,2\text{kg/m}^3$, uma temperatura de 20°C e uma viscosidade dinâmica de $1,8 \times 10^{-5} \text{ Pa.s}$ (Ahrens, 2012).

A temperatura do ponto de orvalho é a temperatura até à qual o ar húmido deve ser arrefecido, a pressão e razão de mistura constantes, para que se atinja a saturação em relação à água líquida. O nível de condensação (pode-se assumir que potencia uma base de nuvem se houver condições meteorológicas) é o nível até ao qual uma parcela de ar húmido pode ascender adiabaticamente antes de atingir a saturação (Ahrens, 2012). Acima deste nível ou altitude começa a ser formada uma nuvem. À superfície terrestre e a uma dada pressão considerada constante, a formação de orvalho acontece quando as superfícies de contacto do ar húmido registam uma temperatura inferior à temperatura de saturação do ar, uma atmosfera sem nuvens e ausência de vento Talaia & Vigário, 2016).

A equação de estado aplicada ao vapor de água permite escrever,

$$e_s = \rho_w R_w T_d \quad (1)$$

em que e_s representa a pressão parcial de saturação do vapor de água à temperatura do ponto de orvalho T_d , ρ_w a massa volúmica do vapor de água e R_w a constante particular do vapor de água.

A humidade relativa do ar, a uma dada pressão, sendo o cociente entre a razão de mistura atual à temperatura do ponto de orvalho e a razão de mistura de saturação à temperatura do ar, permite avaliar se é alta ou baixa a quantidade de água no estado de vapor do ar de uma parcela de ar ou pacote do ar.

A circulação de massas de ar na atmosfera é condicionada pela presença de anticiclones ou de ciclones (Holton, 2004). A origem dos ventos e o seu movimento determina se a massa de ar é rica em vapor de água e para que regiões de deslocam. Se tiverem origem em zonas de elevada evaporação de água e temperaturas altas e se forem movimentadas pelas linhas isobáricas de ciclone ao alcançarem zonas de baixa temperatura favorecem fenómenos extremos de precipitação e inundações incontrolláveis.

A água apresenta como propriedades físicas uma massa volúmica de cerca de 1000kg/m^3 e uma viscosidade dinâmica de cerca de 1cP (centipoise). A água é considerada um líquido não viscoso e favorece regimes de escoamentos turbulentos (Massey, 2002; White, 1983).

Força de arrasto ou força resistente na movimentação de sólidos

O deslocamento de um fluido é realizado a partir das suas linhas de corrente que são curvas imaginárias, tomadas através do fluido, para indicar a direção da velocidade em diversos pontos. As linhas de corrente não podem cortar-se, pois, em caso positivo, a partícula (que estivesse no ponto de intersecção das linhas de corrente) teria velocidades diferentes ao mesmo tempo, o que não é possível (Massey, 2002).

A variação da massa de líquido, contida num determinado volume, limitado por uma superfície durante um certo tempo, é igual ao caudal mássico de líquido através dessa superfície, durante o mesmo tempo, ou seja, é igual à massa de líquido que nele entra, diminuída da massa de líquido que dele sai, durante um intervalo de tempo.

O caudal de fluido que escoar pode ser avaliado através da expressão

$$Q_m = \rho A v \quad (2)$$

em que Q_m representa o caudal mássico, ρ a massa volúmica do fluido, A a área da secção reta de escoamento e v a velocidade média do escoamento.

Um fluido em movimento gera uma força denominada de arrasto definida por

$$F_a = (1/2) C_a A \rho v^2 \quad (3)$$

em que F_a representa a força de arrasto, C_a o coeficiente de arrasto ou de forma do corpo, A a área da secção reta do corpo projetada segundo o movimento do fluido, ρ a massa volúmica do fluido e v a velocidade do fluido. C_a , parâmetro adimensional, depende do tipo de escoamento função do número de Reynolds que define a relação entre as forças de inércia e as forças viscosas (White, 1983; Massey, 2002; Kay e Nedderman, 2013).

Em zonas urbanas, e em zonas com possibilidade de deslizamento de terras e rochas de pequena dimensão, com elevada precipitação, a força de arrasto deve ser valorizada quando atua perpendicularmente numa área produzindo a pressão atuante. A orientação de uma força atuante oblíqua à uma superfície gera duas pressões, uma devida à pressão e outra denominada de tensão de corte.

A água no seu movimento gera um tipo de escoamento turbulento em que as forças de inércia são dominantes e nas linhas de corrente deve ser aplicada o Teorema de Bernoulli (Kay e Nedderman, 2013). As linhas de corrente que são bloqueadas no choque com um corpo geram uma energia cinética a tender para zero aumentando na mesma intensidade a energia de pressão, ou seja, a pressão, em altura manométrica, aumenta de $(1/2)(v^2/g)$.

Em profundidade ou para maior coluna de água, maior será a pressão absoluta que se regista a um nível mais afastado da superfície livre ou interface líquido/atmosfera. A pressão absoluta é determinada pela soma da pressão devida à coluna de água a esse nível de profundidade e da pressão atmosférica ao nível da interface água/atmosfera. Esta situação está em concordância com a Equação Fundamental da Hidrostática (Kay e Nedderman, 2013; Massey, 2002), que mostra ser

$$p_z = p_0 + \rho g z \quad (4)$$

em que p representa a pressão absoluta ao nível z , p_0 a pressão atmosférica, z a altura de coluna de água, ρ a massa volúmica da água e g a aceleração devida à gravidade.

De acordo com a literatura da especialidade (White, 1983; Kay e Nedderman, 2013; Massey, 2002) pode-se escrever para a equação de Bernoulli

$$p/(\rho g) + v^2/(2g) + z = \text{constante}_1 \text{ ou } p + \rho v^2/2 + \rho g z = \text{constante}_2 \quad (5)$$

em que $p/(\rho g)$ representa a energia de pressão, $v^2/(2g)$ a energia cinética e z a energia de posição ou potencial.

Se a uma linha de corrente for aplicada a expressão (5) e essa linha for bloqueada no seu movimento a pressão p passa a ser $p + \rho v^2/2$ e é chamada de pressão de estagnação, quando é mantida a cota z .

Numa linha de corrente de fluido em escoamento, chama-se ponto de estagnação a um ponto onde a velocidade é reduzida a zero, independentemente de efeitos de viscosidade. Qualquer obstáculo fixo, colocado numa corrente de fluido, dá origem a um ponto de estagnação, na proximidade da região frontal do obstáculo. De salientar que a superfície de contorno do próprio objeto é formada por linhas de corrente (dado que não há escoamento através de uma parede) e o fluido, originalmente em deslocamento ao longo da linha de corrente, que não se pode dirigir simultaneamente para a direita e/ou para a esquerda, a velocidade terá de ser nula e gera um ponto de estagnação aumentando a pressão na superfície frontal de contacto.

Leito de partículas sólidas, deslizamento de terras ou de pequenas rochas

Um leito fluidizado geralmente refere-se a um leito de partículas sólidas através dos quais passa um gás ou um líquido e comporta-se num estado das partículas consideradas suspensas e em equilíbrio. Se o leito é constituído por partículas de diferentes diâmetros haverá, função do caudal que o atravessa, um posicionamento ou separação de partículas na vertical.

A velocidade mínima de fluidização, em que $u_{mf} = u_{mf}(\rho_p, \rho_f, d_p, \mu_f)$, acontece quando pela primeira vez, à menor velocidade superficial ($u = Q_f/A$) o peso das partículas iguala $\Delta p(\pi/4)D^2$, ou seja

$$\Delta p = (\rho_p - \rho_f)L_{mf}(1 - \epsilon_{mf})g \quad (6)$$

em que Δp representa a diferença de pressão entre duas tomas de aquisição de

dados, ρ_p a massa volúmica da partícula sólida, ρ_f a massa volúmica do fluido, L_{mf} a altura do leito fluidizado, ϵ_{mf} a porosidade nas condições mínimas de fluidização, g a aceleração devido à gravidade, D o diâmetro da coluna de ensaio com o leito de partículas, Q_f o caudal do fluido injetado na base da coluna, A a área da seção reta da coluna e u_{mf} a velocidade mínima de fluidização.

A literatura da especialidade (Geldart, 1986; Kunii e Levenspiel, 1991; Davidson *et al.*, 1985) apresentam várias expressões para prever a velocidade mínima de fluidização conhecidas as propriedades físicas das partículas e do fluido usando o número de Galileu ou de Arquimedes e o número de Reynolds, como se indica

$$Ga = [\rho_f d_p^3 (\rho_p - \rho_f) g] / \mu_f^2 \quad (7)$$

e

$$Re_{mf} = (\rho_f u_{mf} d_p) / \mu_f \quad (8)$$

em que Ga representa o número de Galileu, μ_f a viscosidade dinâmica do fluido, d_p o diâmetro das partículas,

Talaia (2002) desenvolveu uma expressão com base numa análise adimensional para prever a condição de velocidade mínima de fluidização e para partículas com diâmetro superior a $100\mu m$ e dada por

$$Re_{mf} = [(28,7)^2 + 0,0428Ga]^{1/2} - 28,7 \quad (9)$$

Para o deslizamento de massas de terra ou pequenas rochas em vertentes o estudo científico segue os mesmos fundamentos teóricos para se avaliar os riscos geomorfológicos, com perdas humanas e económicas. As chuvas persistentes são responsáveis por tornarem vulneráveis edifícios e/ou infraestruturas através do movimento de massa de terra ou de rochas.

São diversos os processos que podem levar as vertentes naturais (ou encostas) à instabilidade, o que pode ocorrer por causas internas através de um aumento de tensão tangencial (gravitacional) numa área com potencial rotura ou a inclinações inapropriadas que se tornam mais instáveis com intensa e persistente precipitação que alaga toda a porosidade do leito de terra.

A instabilidade geomorfológica nas encostas pode ser potenciada por fatores hidrológicos, ou seja, por grandes quantidades de água que quebram a tensão de corte que sustenta solos não saturados. Fisicamente falando a água ao preencher os espaços da porosidade dos grãos de areia aumenta a tensão de corte ou tangencial, num determinado

plano de profundidade, provocando a rotura e o início de deslizamentos à superfície ou em profundidade. São estes movimentos de terra ou de pequenas ou grandes rochas que suscitam elevados riscos para infraestruturas, nomeadamente de edifícios, de estradas, de pontes, gerando riscos para a população, economia e sustentabilidade de uma região. Os diferentes tipos de movimentos de massa em vertentes na natureza diferem no processo para a ocorrência. O grau de risco pode ser avaliado quanto à vulnerabilidade de ser potenciado um desastre devido ao movimento de terra ou rochas em vertentes e numa escala de nenhuma perda a uma perda total.

Grãos de areia – movimentação para alimentar dunas na costa litoral da região de Aveiro

O movimento de areia é causado pela transmissão de impulso do vento, para os grãos de areia. O impulso é a quantidade de movimento, expresso por

$$I = mU \quad (10)$$

em que m representa a massa do grão de areia e U a velocidade.

A variação do impulso ao longo do tempo resulta numa força sobre a superfície. As moléculas do ar que colidem com os grãos de areia são sujeitas a fricção e posteriormente estas vão perder quantidade de movimento e desacelerar. As moléculas do ar desaceleradas colidem com as moléculas do ar que não foram desaceleradas das camadas superiores do ar e como resultado, as moléculas das camadas superiores vão desacelerar um pouco. Este efeito é mais pronunciado próximo da superfície.

Quando as moléculas do ar parecem mover-se paralelamente à superfície o movimento pode ser considerado de “escoamento laminar”. Este tipo de escoamento ocorre apenas quando a intensidade da velocidade do vento é muito pequena e não existe movimento ou transporte de grãos de areia.

Na situação em que se regista um vento de corte a aumentar, as camadas paralelas de escoamento deixam de existir e o escoamento torna-se turbulento e a expressão que condiciona o processo é

$$U_z = 5,75U_c \log(z/k_0) \quad (11)$$

em que U_z representa a velocidade no nível z , k_0 a altura acima da superfície onde a velocidade do vento se iguala a zero e U_c a velocidade de corte, ou como mostra Honton (2004),

$$U_z = 2,5 U_c \log(z/z_0) \quad (12)$$

em que z_0 representa a rugosidade da superfície onde o vento de corte atua.

As expressões (11) e (12) indicam que o vento tem um perfil logarítmico. Dada a dificuldade em usar a Lei Logarítmica e pela facilidade de aplicação da lei da Potência, neste trabalho avaliou-se o parâmetro α para dois níveis de medida, através da expressão,

$$U_{z1}/U_{z2} = (z_1/z_2)^\alpha \quad (13)$$

em que z_1 representa a altura ao nível 1, z_2 a altura ao nível 2, U_{z1} a velocidade no nível 1 e U_{z2} a velocidade ao nível 2. O expoente α depende apenas da rugosidade da superfície terrestre local e da estabilidade atmosférica. Há tabelas na literatura de especialidade onde se pode consultar o valor de α . Neste trabalho usou-se $\alpha = 0,15$.

Talaia (2020) desenvolveu um modelo de previsão, denominado “critério Talaia”, considerando a situação física para o início de transporte de um grão de areia sob a ação do vento, através de técnicas de análise dimensional (Talaia, 2000; Kay e Nedderman, 1985; Talaia, 2002), sendo a expressão dada por

$$U \geq 1,034 \times 10^5 (\mu_f^{0,23} \rho_f^{0,77} g^{0,39} d^{0,16} / \rho_s) \quad (14)$$

A expressão (14) mostra que conhecidas as propriedades físicas do fluido (massa volúmica do fluido ρ_f e viscosidade dinâmica do fluido μ_f), a massa volúmica da areia ρ_s e o diâmetro do grão de areia d , é possível avaliar a intensidade da velocidade mínima capaz de dar início ao movimento dos grãos de areia.

Metodologia

Neste trabalho, a partir de um exemplo testado em laboratório, mostra-se o comportamento de um leito fixo a leito fluidizado usando uma corrente de ar e a determinação da velocidade mínima de fluidização. Um excesso de caudal de ar é usado para compreender o comportamento das partículas. Foram registadas fotografias do comportamento do leito. Foi usada uma coluna transparente com

um distribuidor na base de injeção de caudal de ar, tomas de pressão ligadas a manómetros diferenciais de coluna de água e tamanho da areia calibrada.

Em contexto real e em laboratório, areias que alimentam o cordão dunar na costa litoral da região de Aveiro foram investigadas e a recolha de amostras (areia) na zona dunar foi realizada superficialmente, na época do verão, nas coordenadas geográficas aproximadas de N40°37,968' e W008°44,968'. Para compreender como se processa o transporte de areia, usaram-se duas amostras da areia recolhida do cordão dunar (por estratégia se “corou” uma das amostras com corante) avaliando previamente o diâmetro médio, a percentagem dos tamanhos dos grãos de areia, a massa volúmica e a porosidade. Na zona de alimentação das areias, no leito do areal da praia, foram colocadas as duas amostras de areia sobre um tapete plástico e dispostas lado a lado, para observar comportamentos e movimentos, verificar e comparar a influência do vento no arrasto dos grãos de areia e, posteriormente, a areia capturada em ratoeiras (covas em desnível) permitiu registar fotografias da mistura das duas amostras por ação de um vento típico capaz de deslocar as areias. Conhecendo a previsão do vento na zona de arrasto de areias, avaliou-se para a velocidade mínima da tensão de corte e para um ano civil o histograma tipo rosa de ventos para conhecer a orientação do vento que alimenta o cordão dunar. Na zona dunar foram usados um instrumento de medida termohigrómetro, um anemómetro digital e uma bússola de marinheiro.

Um conjunto de imagens que mostram diferentes situações de deslizamento de terra ou de pequenas rochas provocadas por inundações com água permitiram interpretar fisicamente o movimento de partículas sólidas, com base nas expressões apresentadas na secção de fundamentos teóricos.

Resultados e sua interpretação física

Leito fluidizado

Para um leito de areia fixo avaliou-se o seu comportamento quando é atravessado por um caudal de ar. De acordo com os fundamentos teóricos e com base nas expressões (3), (5) e (6) é possível observar como uma corrente de gás torna o leito fixo em leito fluidizado quando é aumentada a intensidade da velocidade superficial.

A experimentação realizada para um leito de areia calibrada e com um diâmetro médio de 215 μ m mostrou que uma velocidade mínima de 4,4cm/s torna o leito fluidizado, ou seja, com características físicas de um fluido. O valor previsto foi de 4,5cm/s (Talaia, 2011). Para um leito de partículas de diâmetro médio de 196,2 μ m aberto a atmosfera os valores registados permitiram determinar uma porosidade do leito de 0,494 (leito fixo) e porosidade nas condições mínimas de fluidização de 0,499.

A fig. 1 mostra para um leito de grãos de areia de diâmetro médio de cerca de 170 μ m a evolução do leito fixo quando se aumenta o caudal de injeção na base da coluna e uma situação em que o leito fluidizado é sujeito a um excesso de caudal, ou seja, o excesso de ar passa no fluido como bolhas de ar.

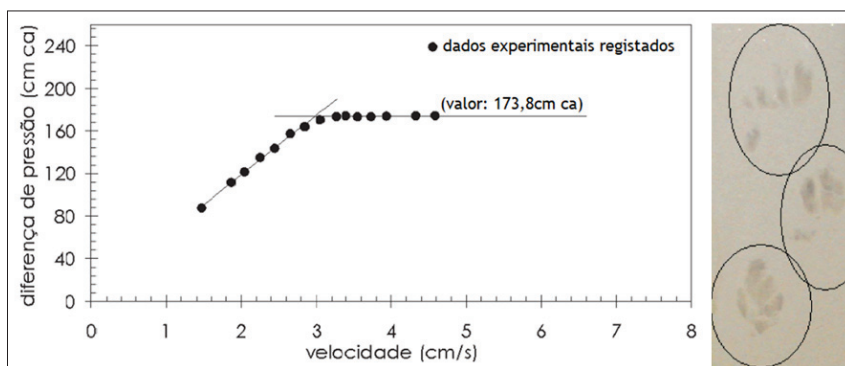


Fig. 1 - Leito de areias atravessado com um caudal de ar.

Fig. 1 - Sand bed crossed with an air flow.

A observação da fig.1 mostra, à esquerda, a determinação da velocidade mínima de fluidização. Adicionalmente é sabido que um fluido em movimento gera uma força denominada de arrasto definida por $F_a = (1/2)C_a A \rho v^2$ e a aplicabilidade do Teorema de Bernoulli $[p/(\rho g) + v^2/(2g) + z = \text{const}]$ nas linhas de corrente que são bloqueadas no choque com uma partícula sólida (neste caso a areia) determina uma energia cinética a tender para zero o que favorece o aumento da energia de pressão desse valor, ou seja, a pressão, em altura manométrica, aumenta de $(1/2)(v^2/g)$, e essa linha bloqueada no seu movimento torna a pressão p em $p + \rho v^2/2$ chamada de pressão de estagnação.

Força de arrasto na movimentação de areias

Os grãos de areia recolhidos no cordão dunar foram estudados para uma velocidade de corte capaz de dar início à sua movimentação. A título de exemplo mostram-se algumas imagens e gráficos obtidos.

Os valores determinados através dos peneiros usados permitiu conhecer a granulometria por gamas de diâmetro, ou seja, em média cerca de 75% dos grãos de areia das dunas apresentam um diâmetro entre 250 μ m e 500 μ m, cerca de 18 % entre 500 μ m e 850 μ m. O restante das amostras colhidas cerca de 7% um diâmetro médio inferior a 250 μ m. As areias, por tamanho calibrado, foram submetidas a uma corrente de ar controlada e gerada por um secador de cabelo ou ventilador. Perpendicularmente ao plano do escoamento foi colocado um anemómetro a 9cm da superfície do movimento das areias para o registo da intensidade do vento (fig. 2).

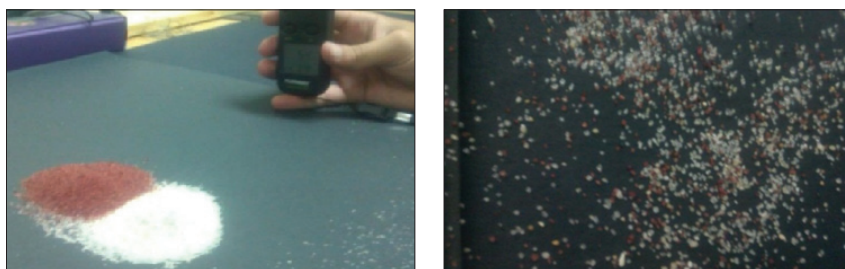


Fig. 2 - Registo da velocidade capaz de iniciar o movimento de areias.

***Fig. 2** - Record of the speed capable of initiating the movement of sand.*

Na fig.2 e, numa fase experimental, já é observável o arrasto de areias pela intensidade da velocidade do vento que é gerada. A intensidade da velocidade que iniciava o transporte da areia foi registada, para cada gama de diâmetro controlada de areia.

Os dados recolhidos foram tratados numa folha de programa Microsoft Office Excel. Determinou-se para cada tamanho de grão de areia, o peso médio, o diâmetro médio, a força de arrasto, o número de Reynolds, o número de Galileu, o número de Reynolds na condição mínima de fluidização, a velocidade mínima

de fluidização e a velocidade para o início de transporte de grãos de areia. Para a obtenção do coeficiente de resistência ou de arrasto usou-se o diagrama de Moody.

Na fig.3 mostra-se a influência do peso do grão de areia na força de arrasto ou de corte. A observação do gráfico mostra círculos de cor verde-escura que indiciam o início de arrastamento ou transporte de grãos de areia. Os círculos de cor verde-alface indiciam a situação prática experimental de grãos de areia a serem movimentados.

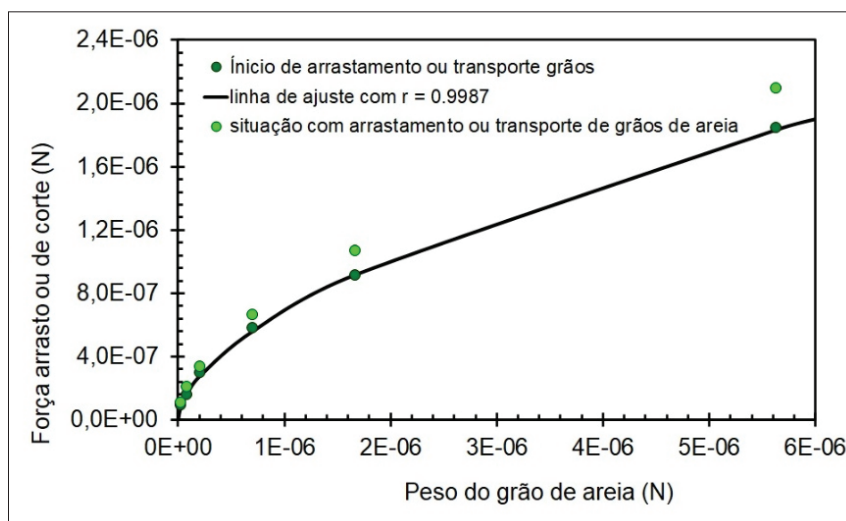


Fig. 3 - Força de arrastamento “versus” peso do grão de areia.

Fig. 3 - Drag force “versus” the weight of the grain of sand.

A observação da fig. 3 mostra, ainda, uma linha a “negrito” contínua que faz a separação entre os grãos de areia em repouso e o início do seu movimento. Para o mesmo peso do grão de areia, valores da força de arrasto superiores aos valores indicados pela linha a “negrito” traçada indiciam o início e o consequente deslocamento do grão de areia. Na prática, os valores indicados a círculo cheio com cor verde-alface correspondem a situações em que o movimento de areia era bem visível. Nestas circunstâncias o modelo desenvolvido denominado “critério Talaia”, ver expressão (14), foi testado para prever a intensidade do vento capaz de iniciar o transporte dos grãos de areia.

A fig.4 mostra que quando se conhece o diâmetro de um grão de areia é possível prever a intensidade da velocidade do vento que dá início ao seu movimento ou transporte. Os valores previstos pelo modelo critério Talaia e válidos até um diâmetros de grão de areia de 500 μ m (Talaia, 2020) mostram excelente concordância com os valores registados experimentalmente.

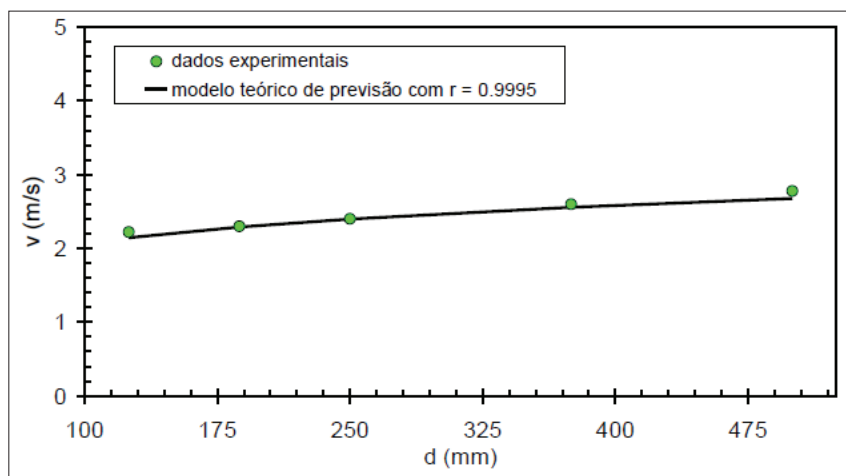


Fig. 4 - Intensidade do vento para o início de transporte de grão de areia – “critério Talaia”.

Fig. 4 - Wind intensity for the beginning of sand grain transport – “Talaia criterion”.

As estações meteorológicas automáticas medem parâmetros meteorológicos normalmente a 10m acima do solo. Os valores registados experimentalmente, neste trabalho, foram projetados para uma altura de 10m usando a expressão (13), prevendo uma velocidade do vento mínima de 4,5cm/s para o início do movimento de areias. Nestes termos, com base num ficheiro anual de dados meteorológicos foi possível conhecer o rumo e o número de horas que contribuem, em média, para a alimentação de areias existentes no leito do areal para o cordão dunar. Os resultados mostraram que durante cerca de 2780 horas a intensidade do vento desloca areias para alimentar a formação do cordão dunar, ou seja, um valor de cerca de 31,7% do total anual e com um rumo predominante de NNW (cerca de 315°).

Deslizamento de terra e pequenas rocha favorecidas por inundações com caudal significativo

De seguida mostram-se várias situações devido a deslizamento de terra e objetos na Ribeira Quente, ilha da Terceira nos Açores (fot. 1).

A observação de cada imagem mostra que um solo saturado, devido a chuva persistente e com alta intensidade, potencia a formação de correntes de água com intensidade de destruição em leitos definidos pela sua passagem. A natureza torna-se implacável destruindo tudo à sua frente, usando como meio a coluna de água em movimento. De acordo com a expressão (3) a massa volúmica da água tem um fator de 1:2,6 face a partículas sólidas (areia e/ou pequenas rochas) que condicionada com a intensidade da corrente da água as torna de mais fácil deslocamento. Junto ao leito criado pela corrente de água e nas condições de escoamento turbulento a tensão de corte potencia o arranque de sólidos. Também devido às linhas de corrente de água que são bloqueadas, os corpos que se posicionam na corrente de água, são afetados por um aumento de pressão de $p + \rho v^2/2$ provocando danos irreparáveis através de catástrofe.



Fot. 1 - Deslizamento de terra e objetos na Ribeira Quente.

Photo 1 - Landslide and objects in Ribeira Quente.

(Fonte/Source: adaptado de/ adapted from: <https://www.youtube.com/watch?v=LqAg6ZNUzIM>).

Mostra-se também uma imagem em que as intensas chuvas persistentes tornaram a vertente de uma via rodoviária perto de Tabuaço, norte do distrito de Viseu, vulnerável a colapso e invasão da via (fot. 2). A infiltração da água ao preencher toda a rede interna porosa da vertente tornou instável com consequente rotura da superfície de equilíbrio de suporte da massa gravítica.



Fot. 2 - Rotura da superfície de suporte e colapso.

Photo 2 - *Failure of the support surface and collapse.*

(Fonte/Source: adaptado de /adapted from: <https://www.facebook.com/MeteoTrasOsMontes>).

Uma outra imagem mostra, inequivocamente, como a energia de pressão de um escoamento turbulento de água é capaz de provocar em infraestruturas construídas pelo ser humano. A estrada ficou interrompida ao trânsito (entre Monforte e Veiros, Estremoz) e a força da água levou quer o leito de partículas quer o tapete á superfície (fot. 3). A energia de pressão é a responsável pelo abaloamento e transporte de partículas sólidas. De acordo com a interpretação física da força de arrasto a sua

pressão quando encontra uma superfície aumenta e gere normalmente uma pressão e uma tensão de corte. Esta num corpo que impede a passagem livre da água faz as linhas de corrente inclinarem-se para o fundo ou base do leito com consequente arranque e transporte dos mais variados corpos sólidos.

Se a teoria da propagação do erro for considerada para a expressão da força de arrasto chega-se à conclusão que o erro relativo da força de arrasto depende essencialmente do erro relativo da área do corpo segundo o plano perpendicular do escoamento do fluido e do erro relativo da intensidade da corrente de água. Nestes termos, o peso relativo da intensidade da velocidade do fluido tem fator duplo o que sugere que para a mesma área transversal de um corpo um aumento da intensidade da velocidade de fluido de 20% implica um aumento de 40% da intensidade da força de arrasto, aumentando abruptamente a pressão e a tensão de corte no corpo o que facilita o seu movimento e destruição imprevisível.



Fot. 3 - Trânsito interrompido entre Monforte e Veiros.

Photo 3 - Traffic interrupted between Monforte and Veiros.

(Fonte/Source: adaptado de/adapted from: <https://linhasdeelas.pt/2022/12/22/transito-condicionado-no-ip2-devido-a-abatimento-parcial-da-estrada-em-monforte/>).

O impacto de inundações dinâmicas, como se registou em Lisboa, em que a coluna de água se tornou significativa potenciou intensas correntes de água que não só inundam locais e vias rodoviárias como fazem viaturas serem deslocadas sem dificuldade devido à energia de pressão que é suscitada (fot. 4).



Fot. 4 - Rua alagada e carros danificados.

Photo 4 - Flooded street and damaged cars.

(Fonte/Source: adaptado de/adapted from: <https://www.jn.pt/local/noticias/lisboa/lisboa/carros-submersos-e-ruas-alagadas-videos-mostram-inundacoes-em-lisboa-15447642.html>).

A observação da fot. 4 mostra carros submersos e ruas alagadas. Há viaturas que são arrastadas pois face a massa volúmica da água apresentam uma massa volúmica que potencia a flutuação e o consequente arrastamento com impactos imprevisíveis.

Hoje quando se fala nas alterações climáticas e consequente aquecimento global deve-se valorizar a possibilidade de haver riscos para o ser humano através de catástrofes pois as notícias mostram não haver atualmente uma zona impermeável às intempéries. Um exemplo é descrito a seguir. A partir de 8 de dezembro de 2022 as cartas meteorológicas do IPMA (Instituto Português do Mar e da Atmosfera) mostravam que as massas de ar eram originadas do Norte de África, origem em que há uma evaporação elevada e ativa com consequente enriquecimento da quantidade de vapor de água na atmosfera. O ciclone que afetava a costa portuguesa mostrava que os ventos que traziam essas massas de ar, via Norte de África, ao entrarem em Portugal Continental eram obrigados a arrefecer e a respetiva condensação do vapor de água formou nuvens geradoras de precipitação ininterrupta, com consequentes inundações. O local onde o autor reside não foge à proteção da natureza e as chuvas intensas ao longo de vários dias fez precipitar o deslizamento da vertente da estrada pondo em perigo quem atravessar a via pública (fot. 5). Os factos observados sugerem, que no futuro, a habitação será mais vulnerável ao risco de instabilidade se

nenhuma ação for tomada. De facto, a imagem mostra que a inclinação da vertente não parece ser estável face ao ângulo de suporte de terra gerado pela própria natureza.



Fot. 5 - Deslizamento de terras, estrada entre Sernada e Carvoeiro, Águeda (Fotografia de Mário Talaia, tirada a 20/12/2022).

***Photo 5** - Landslides, road between Sernada and Carvoeiro, Águeda (Photography by Mário Talaia taken on 20/12/2022).*

Considerações finais

Os resultados deste trabalho permitem tirar algumas considerações e estratégias de intervenção para o conhecimento de escoamentos de duas fases, educação para o risco e um respeito face à natureza.

Os resultados apresentados mostraram que é possível passar um leito fixo de partículas para um leito fluidizado usando um gás ou um líquido. Se um líquido for usado é potenciada a força de arrasto numa escala de cerca de 1:1000 para a mesma velocidade de escoamento.

Foi possível mostrar que é possível prever o deslocamento de areias com diâmetro médio inferior a 500µm quando se conhecem as propriedades físicas do fluido. A alimentação de um cordão dunar é importante para a proteção de zonas

urbanas junto a costa marítima. O risco das zonas urbanas junto ao litoral quando há destruição de dunas, por avanço das águas do mar devido a vagas, é elevado com consequências imprevisíveis. Medidas de proteção devem ser permanentemente implementadas de modo a manter reduzido o risco de invasão das águas do oceano.

As imagens de deslizamento de terra e/ou pequenas rochas e inundações mostram que o ser humano tornou-se impotente para dominar as forças da natureza. Neste respeito linhas de investigação podem ser sugeridas considerando que as alterações climáticas e consequente aquecimento global não devem ter as “*costas*” assim tão largas para justificar inundações, deslizamentos e catástrofes.

Muito do que está a acontecer tem a ver com planeamento que é apresentado, ou seja, mais construção urbana o que favorece a impermeabilização da superfície terrestre. Por outro lado, a falta de sumidouros, solos a céu aberto, paredões de defesa, túneis dimensionados e apropriados para extremos de precipitação são determinantes para o não agravamento de aluimento de terra e aumentar a força da água com consequências para infraestruturas, edifícios, e abalroamento de carros estacionados. Os túneis a construir para escoamento de água devem considerar como limitação as curvas que forçam as linhas de corrente do fluido aumentando a tensão de corte e pressão e não estrangular a capacidade de escoar livremente caudais de água, devido a inundações extremas.

Os decisores devem garantir a manutenção da permeabilidade dos solos para ser possível escoar a água de excesso em situações de fenómenos extremos. Na prática, a construção de edifícios ou pavimentação de solos não pode ser realizada contra a vontade da natureza. Face aos cenários do IPCC (Painel Intergovernamental para as Alterações Climáticas) as populações devem habituar-se a viver com uma maior frequência de fenómenos extremos e os decisores devem preparar o planeamento urbano para se evitar ou reduzir eventuais riscos.

Adicionalmente a desflorestação e os incêndios potenciam encharcamento devido a chuvas intensas. Uma cidadania para eventuais riscos, na formação cívica, sugere um alicerce para o respeito da natureza. A escola deve ser um elo forte na formação de estudantes para uma Educação para o Risco.

O ser humano deverá ter sempre presente a questão: até onde se situará o patamar de segurança?

Agradecimentos

O autor agradece-o trabalho financiado por Fundos Nacionais através da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P., no âmbito do projeto UIDB/00194/2020 (CIDTFF).

Referências bibliográficas

- Ahrens, C. D. (2012). *Essentials of Meteorology: An Invitation to the Atmosphere*. Sixth Edition Brooks/Cole, Cengage Learning, Belmont, USA.
- Davidson, J.F., Clift, R. e Harrison, D. (1985). *Fluidization*. Academic Press, London.
- Geldart, D. (1986). *Gas Fluidization Technology*. John and Sons, Ltd. Chichester, New York, Brisbane, Toronto, Singapore, p. 468.
- Holton, J. R. (2004). *An Introduction to dynamic meteorology*. International Geophysics Series, vol. 88. Elsevier Academic Press, Fourth Edition. San Diego – California, USA.
- IPCC (2020). *AR6 Climate Change 2021: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. The Working Group II contribution to the Sixth Assessment Report. Intergovernmental Panel on Climate Change. URL: <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-ii/> (online 27set2020)
- Iribarne, J. V. e Cho, H. R. (1980). *Atmospheric physics*. R. Reidel Publishing Company, Dordrecht.
- Kay, J. M. e Nedderman, R. M. (2013). *An Introduction to Fluid Mechanics and Heat Transfer: With Applications in Chemical & Mechanical Process Engineering*. Cambridge University Press.
- Kunii, D. e Levenspiel, O. (1977). *Fluidization Engineering*, Robert E. Krieger Publishing.
- Massey, B. S. (2002). *Mecânica dos Fluidos*, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa.
- Salby, M. L. (1995). *Fundamentals of atmospheric physics*, vol 61 in the International Geophysics Series, Edited by Renata Dmowska and James R. Holton, Academic Press, Inc., London.
- Talaia, M. (2000). Uma análise dimensional – ascensão de uma bolha no interior de um líquido, *Gazeta de Física*, Vol. 23 (2), 9-12.
- Talaia, M. (2002). Incipient Fluidization: The Influence of the Pressure on the Minimum Fluidizing Velocity and Voidage Fraction. *Paper Presented on the 2nd Annual European Multiphase Systems Institute meeting and 40th European Two-Phase Flow Group meeting*, Stockholm, Sweden, Paper D-5, 3 pages.
- Talaia, M. (2011). Areia Fluidizada como Olhos de Água – um Potencial Risco. *Territorium - Revista da Associação Portuguesa de Riscos, Prevenção e Segurança*, n.º 18 "Afirmar as Ciências Cindínicas", Editor: RISCOS - Associação Portuguesa de Riscos, Prevenção e Segurança, ISSN: 0872-8941, Lousã, 255-261. DOI: https://doi.org/10.14195/1647-7723_18_24
- Talaia, M. (2020). Formação e destruição de dunas suscita risco para zona costeira urbana. Uma abordagem de conflito. In *Redução do Risco de Desastres e a Resiliência no meio Rural e Urbano* (p. 729-743). Editora do Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza.
- Talaia, M. e Vigário, C. (2016). Temperatura de ponto de orvalho: um risco ou uma necessidade. *Geografia, Cultura e Riscos - Livro de Homenagem ao prof. Doutor António Pedrosa* (p. 169-197). Coords. Luciano Lourenço. Editorees: RISCOS - Associação Portuguesa de Riscos, Prevenção e Segurança e IUC - Imprensa da Universidade de Coimbra,Coimbra, série Riscos e Catástrofes, volume 4. DOI: http://dx.doi.org/10.14195/978-989-26-1237-9_7
- White, F. W. (1983). *Mecânica de Fluidos*, McGraw-Hill, Madrid.

**RISCOS GEOMORFOLÓGICOS NO NOROESTE DE
PORTUGAL: DA INCÚRIA ÀS LACUNAS
NO PLANEAMENTO**

**GEOMORPHOLOGICAL RISKS IN NORTHWEST
PORTUGAL: FROM CARELESSNESS TO GAPS
IN PLANNING**

António Vieira

Universidade do Minho, CECS e RISCOS (Portugal)
Instituto de Ciências Sociais, Departamento de Geografia
ORCID: 0000-0001-6807-1153 vieira@geografia.uminho.pt

António Bento-Gonçalves

Universidade do Minho, CECS e RISCOS (Portugal)
Instituto de Ciências Sociais, Departamento de Geografia
ORCID: 0000-0002-9646-156X bento@geografia.uminho.pt

Jorge Novais

Universidade do Minho, CECS (Portugal)
jorge.novais.98@gmail.com

Rui Costa

Autoridade Nacional de Emergência e Proteção Civil (Portugal)
Comando Sub-Regional de Emergência e Proteção Civil do Ave
rf.costa@prociv.pt

Júlio Melo

Câmara Municipal de Esposende (Portugal)
Serviço Municipal de Proteção Civil
julio.melo@cm-esposende.pt

Resumo: A ocorrência de desastres (acidentes graves e catástrofes) de natureza geomorfológica no território nacional tem-se verificado com alguma frequência e mesmo com uma certa recorrência, lembrando o seu carácter destrutivo e reativo face quer às dinâmicas naturais quer às ações e intervenções antrópicas sobre a superfície terrestre. Aborda-

se a problemática dos riscos geomorfológicos e a sua recorrência no tempo, favorecida pela incúria da sociedade e dificuldade em aprender com os erros cometidos. Partindo de exemplos ocorridos no Noroeste de Portugal no século XXI, ilustramos esta realidade, que nos desperta para a falta de consciencialização de decisores e de uma cultura de autoproteção da população para com este tipo de riscos e para as condicionantes de origem antrópica que concorrem para a sua ocorrência.

Palavras-chave: Movimentos em massa, ação antrópica, Noroeste de Portugal.

Abstract: The occurrence of disasters (severe accidents and catastrophes) of a geomorphological nature in Portugal has happened with some frequency and even with a certain recurrence, reminding us of their inevitability, their destructive and reactive nature in the face of both natural dynamics and anthropogenic actions and interventions on the earth's surface. The problem of geomorphological risks and their recurrence over time is addressed, favored by society's carelessness and difficulty in learning from its mistakes. Using examples from the northwest of Portugal in the 21st century, we illustrate this reality, which awakens us to the lack of awareness of decision-makers and a culture of self-protection among the population itself about this type of risk and the anthropogenic factors that contribute to its occurrence.

Keywords: Mass movements, anthropogenic action, Northwest Portugal.

Introdução

A ocorrência de riscos geomorfológicos e, especificamente, de movimentos em massa (Vieira *et al.*, 2020), é frequente no território nacional, e está bastante presente também na região correspondente ao Noroeste de Portugal continental.

Várias têm sido as publicações a tratar este tipo de desastre de origem eminentemente natural no Noroeste de Portugal, mas cada vez mais com influência da ação antrópica (Bateira e Soares, 1992; Pedrosa, 1994; Pedrosa e Marques, 1994; Pedrosa *et al.*, 1995; Bateira e Soares, 1997; Pedrosa *et al.*, 2001; Bateira *et al.*, 2014; Bento-Gonçalves, 2023).

O projeto Disaster (Zêzere *et al.*, 2014), coordenado por José Luís Zêzere, inventariou as ocorrências no território de Portugal continental durante 150 anos, com base em informações coletadas em jornais de âmbito nacional, concluindo que no período considerado ocorreram 1950 desastres hidrogeomorfológicos que tiveram como repercussão direta a perda de 1256 vidas humanas, obrigaram à evacuação de 14884 pessoas e 41977 deslocados (Zêzere *et al.* 2020). Daquele total, 292 desastres identificados corresponderam a movimentos em vertentes e foi possível identificar que a maioria se concentrou na região de Lisboa e vale do Tejo, bem como na região do Porto e vale do rio Douro (Santos, 2004; Vieira, 2008; Soares e Bateira, 2013). Também é perceptível a significativa frequência de eventos no Noroeste de Portugal (Zêzere *et al.* 2020; Pereira *et al.*, 2020).

Com efeito, a contribuição do ser humano para o desencadeamento ou para o aumento da vulnerabilidade a este tipo de desastres tem-se multiplicado, especialmente pela ocupação de áreas com características físicas menos adequadas à implantação das atividades antrópicas e frequentemente evidenciando incremento da exposição face a estes fenómenos naturais.

Os casos que descrevemos neste texto constituem, em nosso entender, situações que resultam ora da incúria do ser humano, ocupando espaços onde o risco é significativo, mesmo que nem sempre perceptível, ora da falta de conhecimento e de implementação/verificação dos instrumentos de planeamento existentes.

Não pretendemos, portanto, efetuar uma análise exaustiva e pormenorizada e puramente científica aos fenómenos em si, mas evidenciar os problemas relacionados

com a desconsideração dos processos naturais e dinâmicas que caracterizam e regem a evolução das vertentes no Noroeste de Portugal.

Enquadramento geográfico do Noroeste de Portugal

O Noroeste de Portugal corresponde a um território limitado a norte pelo rio Minho (e fronteira com Espanha, mais para o interior), a sul pelo rio Douro e a oeste pelo oceano Atlântico. O limite oriental é definido, grosseiramente, pelo alinhamento montanhoso que se estende desde a Serra do Larouco (a norte) até à Serra do Marão (mais a Sul), limitado pelo desligamento tardi-hercínico Verín-Régua-Penacova. De facto, este elemento morfo-estrutural estabelece uma diferenciação bem marcada (quer a nível geomorfológico, quer climático, quer da distribuição da vegetação e do próprio uso do solo) entre o noroeste e o interior norte de Portugal, correspondente à região de Trás-os-Montes.

Este território integra os distritos de Viana do Castelo, Braga, Porto e ainda alguns municípios do distrito de Vila Real.

Considerando a divisão administrativa, corresponde a um território que abrange uma área de aproximadamente 9.369 km², integrando cerca de 45 municípios (total ou parcialmente) e 7 unidades territoriais de nível III (NUTSIII), nomeadamente o Alto Minho, o Cávado, o Ave e, parcialmente, o Tâmega e Sousa, a Área Metropolitana do Porto, o Alto Tâmega e Barroso e o Douro (fig. 1).

No que diz respeito ao quadro físico, este território apresenta características bastante específicas, quer no que diz respeito à configuração do relevo e dinâmicas hidromorfológicas associadas, quer do ponto de vista climático e de distribuição da vegetação, criando paisagens bastante peculiares e cruzando-se com uma ocupação antrópica do território muito própria e distinta do resto do território nacional, muito em virtude dos condicionalismos físicos aqui existentes.

No que diz respeito à orografia desta região, observa-se um vincado contraste entre o litoral e o interior. O relevo apresenta-se escalonado de oeste para este, chegando a “erguer-se” dos 0 aos 1500 metros (serra do Gerês) em menos de 70 quilómetros (fig. 2). O setor oriental apresenta as maiores altitudes, identificando-

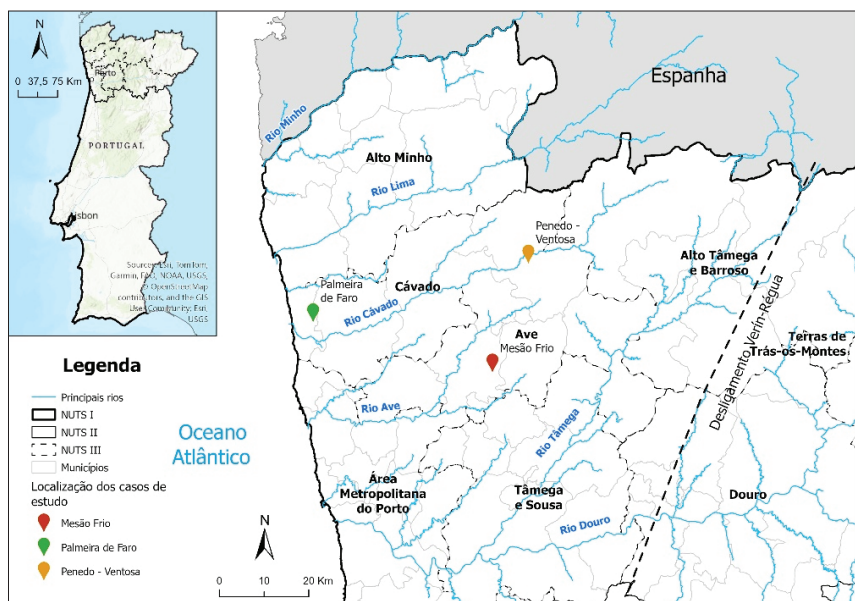


Fig. 1 - Localização do Noroeste de Portugal e divisão administrativa.

Fig. 1 - Location of Northwest Portugal and administrative division.



Fig. 2 - Relevo e principais rios do Noroeste de Portugal.

Fig. 2 - Relief and main rivers of Northwest Portugal.

se as serras da Peneda, Amarela, Gerês, Larouco, Barroso, Cabreira, Alvão e Marão, formando, de norte para sul, um conjunto montanhoso que confere ao território o aspeto de “*um anfiteatro voltado para o mar*” (Ribeiro, 1986). Com efeito, a morfologia sugere um “anfiteatro”, já que corresponde a uma sequência de relevos cada vez mais elevados, em direção a este, às principais montanhas do Noroeste de Portugal: Serra da Peneda (1416 metros), Serra Amarela (1335 metros), Serra do Gerês (1544 metros), Serra da Cabreira (1262 metros).

Os principais rios (Minho, Lima, Cávado e Ave), como referem Lema e Rebelo (1996), apresentam uma direção “bética” (ENE-WSW) e caracterizam-se por correrem em vales muito largos e abertos, junto ao litoral, e em vales muito profundos e estreitos nas áreas montanhosas, áreas essas não muito distantes do litoral e com declives muito acentuados.

Não admira, pois, que as montanhas mais importantes se encontrem separadas pelos vales profundos dos principais rios que drenam o Noroeste português.

A paisagem é marcada, ora por vertentes abruptas, com perfil rígido, ora por vertentes com grandes blocos e bolas graníticas que escaparam à arenização e ainda por mantos de alteração (as “arenas”) que “[...] *cobrem quase todas as vertentes das bacias inferiores dos principais rios desde a saída dos grandes maciços montanhosos até às regiões litorais*” (Braga, 1988).

A originalidade do relevo desta região reside, segundo Ferreira (1983), na fisionomia dos seus vales principais que, “[...] *sensivelmente paralelos, de direção NE-SW e ENE-WSW, são muito largos a jusante, com fundo plano e vertentes abruptas, características que se vão atenuando para Leste, mas que só desaparecem no sopé ocidental das mais altas montanhas do interior desde a Peneda ao Marão, onde os rios correm apertados em vales muito profundos*” (fig. 2).

A erosão hídrica, dum modo geral, é um problema importante nesta região. Segundo o LNEC (1985), as bacias hidrográficas desta região estão, na sua maior parte, localizadas numa zona considerada de “*baixa erosão hídrica atual e potencial*”, com exceção das zonas montanhosas das cabeceiras, que representam áreas de “*elevada erosão atual*”. A forte pluviosidade e o relevo das cabeceiras são os principais responsáveis pelos valores que se estimam para estas zonas. A produção de sedimentos atingirá as 800 toneladas/km²/ano, na parte superior destas bacias,

descendo para valores da ordem das 200 a 500 toneladas/km²/ano nas regiões de transição para o litoral, que são, simultaneamente, dos valores mais altos que ocorrem em Portugal Continental (LNEC, 1985).

Assim, o relevo do Noroeste de Portugal, para além do condicionamento climático atual, apresenta marcas de climas anteriores, fruto das grandes oscilações climáticas ao longo dos tempos geológicos. No entanto, o cunho mais vincado, é-lhe imprimido pela geologia e pela tectónica.

Do ponto de vista litológico, a região do Noroeste de Portugal é caracterizada pelo predomínio das rochas graníticas, quartzitos, xistos e diversas rochas afins destas, encontrando-se ainda formações de cobertura do Holocénico (aluviões) e do Plio-Plistocénico (terraços fluviais) (fig. 3).

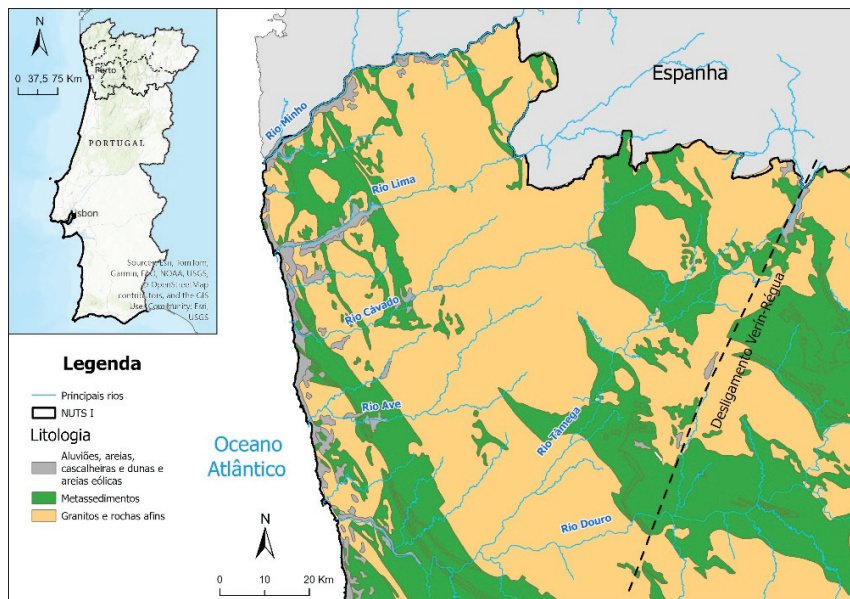


Fig. 3 - Carta geológica simplificada do Noroeste de Portugal.

Fig. 3 - Simplified geological map of northwest Portugal.

Os afloramentos de rochas ígneas estão distribuídos abundantemente por todo o Noroeste. São essencialmente rochas pertencentes ao grande maciço granítico do Minho e das Beiras, existindo ainda uma pequena zona designada

por “Granito do Porto”. Predominam os granitos calco-alcalinos de grão grosseiro, porfíroide, mas ocorrem frequentes diferenciações quer texturais, quer composicionais. Estas rochas correspondem a Granitos sin-orogénicos e tardi a pós-orogénicos (Ferreira *et al.*, 1987), cuja instalação se ficou a dever aos movimentos hercínicos, do final da era Primária. Refira-se, no entanto, que “[...] *a existência de grandes escarpas de falha, por vezes ultrapassando os 200 metros, tanto na área da Peneda e do Gerês, como na área de Monção e Arcos de Valdevez, é prova suficiente de que importantes movimentações tectónicas se verificaram no quadro do ciclo alpino*” (Lema e Rebelo, 1996). Os dados existentes sobre a evolução tectónica no território português no Neogénico e Quaternário indicam que após o período Miocénico, caracterizado por atividade tectónica intensa em várias áreas, se seguiu um intervalo de relativa acalmia no Pliocénico, acentuando-se novamente a atividade tectónica no final do Pliocénico, prolongando-se pelo período Quaternário.

As intrusões graníticas desta região conferem os traços mais marcantes à geologia de toda a zona abrangida pelo Noroeste. Como resultado destes acontecimentos, as formações sedimentares sofreram metamorfismo e foram fortemente dobradas e fraturadas. A distribuição geográfica das formações metassedimentares em bandas alongadas, com orientação NW-SE, é uma consequência dessas ações da geodinâmica interna.

Os movimentos hercínicos foram responsáveis pela formação de densa rede de fraturas, algumas das quais de grande extensão. Como resultado daquelas atividades tectónicas, as redes de fracturação apresentam orientações principais NW-SE e NE-SW ocorrendo também algumas fraturas E-W. Desta forma, a rede de drenagem de toda a região é profundamente condicionada pela tectónica, com os vales escavados ao longo de fraturas, conferindo disposição característica ao modelado fluvial; só assim se compreendendo o traçado retilíneo e o paralelismo de certos cursos de água, e, mesmo, a topografia da região cujas altitudes diminuem, duma maneira geral, de NE e SE para W.

No contacto com o maciço granítico, podem observar-se orlas do metamorfismo termal, constituídas por corneanas pelíticas e xistos mosqueados de idade Paleozóica e Ante-Ordovíica.

O Ordovício aflora na região sueste da área e é litologicamente constituído por xistos finos e quartzitos, estes formando “cristas” de algumas das serras, aflorando, o Complexo Xisto-Grauváquico, sob a forma dispersa de pequenos retalhos.

Os aluviões dos rios, as areias litorais e os terraços fluviais e marinhos constituem as formações geológicas mais recentes, com expressão cartográfica reduzida. Os vales dos principais rios da região alargam em parte dos seus percursos e ficam cobertos por depósitos aluvionares arenosos e areno-silto-argilosos, geralmente aproveitados para agricultura. Dispersos pela região, são observáveis terraços quaternários, relacionados com as principais linhas de água, constituídos por calhaus rolados, ligados por matriz argilo-arenosa. Existem terraços fluviais mais antigos, plistocénicos, que ocorrem em níveis elevados em relação aos cursos atuais das principais linhas de água. São formações detríticas, de origem fluvial e de natureza essencialmente arenosa, argilosa e conglomerática. Atendendo às características destas formações, o modelado da região tanto conserva a morfologia madura de vales abertos e de vertentes suaves, como as formas abruptas das vertentes das escarpas de falha e dos vales de fratura, como referido anteriormente.

O Noroeste de Portugal caracteriza-se por um clima de afinidades mediterrâneas, com temperaturas amenas, pequenas amplitudes térmicas e forte pluviosidade, resultado da influência atlântica. Apesar duma situação claramente mediterrânea, a proximidade do oceano e a morfologia minhota favorecem a influência atlântica. “*Na distinção entre um Portugal húmido e um Portugal seco intervém assim, fortemente, o contraste de relevo. [...] É ainda à barreira formada pela corda de serras do Minho ao Caramulo, grande área de condensação logo atrás do litoral, que se deve o contraste entre uma região atlântica e outra interior, menos húmida [...]*” (Ribeiro, 1986). Este conjunto montanhoso, muitas vezes designado por “barreira de condensação”, tem implicações climáticas regionais, visto condicionar a precipitação, dando origem a elevados quantitativos.

Os valores da precipitação média anual variam nesta região entre 1000 mm e 3500 mm. A precipitação aumenta com a altitude e com o afastamento ao litoral. De facto, a característica climática mais marcante do Noroeste é, inquestionavelmente, os seus elevados quantitativos pluviométricos (Costa, 2008).

A precipitação média anual é relativamente elevada — cerca de 1800 mm — muito acima do valor médio para o território de Portugal Continental, que é cerca de 900 mm (LNEC, 1985).

A sua distribuição ao longo do ano é principalmente condicionada por dois fatores:

- 1) A posição média do Anticiclone dos Açores e de sistemas depressionários que se deslocam de Oeste para Este, na circulação geral da atmosfera, diminuindo a sua atividade de Norte para Sul, o que origina uma marcada variação sazonal no regime pluviométrico (fig. 4);
- 2) Um outro fator com forte influência na distribuição e quantidade de precipitação, que se verifica, como vimos, é o seu relevo. Na realidade, o avanço sucessivo de massas de ar ciclónico, carregadas de humidade, não encontra na zona central e de jusante da bacia, grandes obstáculos à sua passagem, o que se vem a verificar apenas nas zonas montanhosas da parte superior das bacias hidrográficas. As massas de ar húmido marítimo são obrigadas a subir as encostas existentes a Leste da região, originando chuvas, que se traduzem na precipitação mais elevada desta zona.

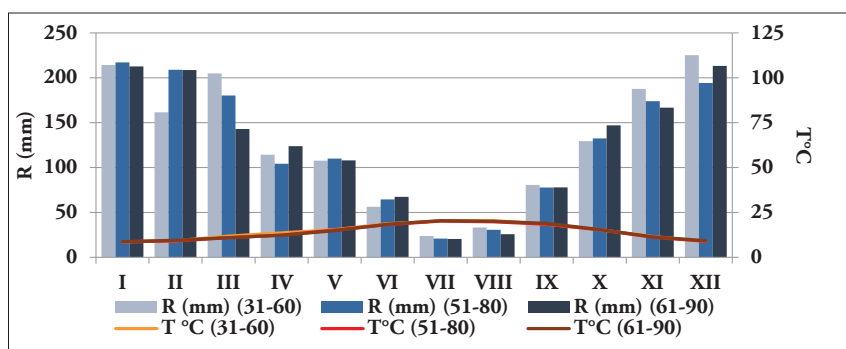


Fig. 4 - Gráfico termopluviométrico de Braga (1931-1960 / 1951-80 / 1961-90)
(Fonte: SMN, 1965; INMG, 1991; IM 2005).

Fig. 4 - Thermopluviometric graph for Braga (1931-1960 / 1951-80 / 1961-90)
(Source: SMN, 1965; INMG, 1991; IM 2005).

Segundo Daveau (1985), o Noroeste de Portugal é caracterizado por invernos frescos e verões moderados a quentes, que se traduzem numa temperatura mínima média do mês mais frio que varia entre 2 e 4 °C, verificando-se durante 10/15 a 30 dias por ano temperaturas negativas. A temperatura máxima média do mês

mais quente varia entre 23 e 32 °C, verificando-se durante 20 a 120 dias por ano temperaturas máximas superiores a 25 °C. De acordo com os dados climáticos de síntese publicados nas normais climatológicas de 1931-1960, 1951-1980 e 1961-1990, a temperatura média mensal variou entre os 8,6 °C (registados em janeiro, no período 1931-1960) e os 20,4 °C (registados em agosto, no período de 1931-1960 e em julho, no período de 1961-1990).

A distribuição espacial da temperatura do ar, nesta região, é condicionada pela latitude, e acima de tudo por fatores fisiográficos locais, nomeadamente a altitude, a exposição, a proximidade do mar, a natureza do solo e o seu revestimento.

Pelos critérios de Koppen, o clima é do tipo Csb, com o seguinte significado:

- Cs - clima mesotérmico com Verão seco;
- b - verão quente e extenso, com temperaturas médias inferiores a 22 °C com um período maior que quatro meses com temperaturas superiores 10 °C.

Esta abundância de disponibilidade de recursos hídricos é, na quase totalidade de origem superficial, dado que as características hidrogeológicas da região determinam uma muito reduzida produtividade dos aquíferos.

A influência que o clima e o relevo exercem nos aspetos do meio físico estende-se igualmente às unidades básicas dos sistemas paisagísticos: as florestas, os matos arbustivos, as zonas agrícolas e as estruturas urbanizadas (fig. 5).

O Noroeste caracteriza-se por uma marcada diversidade de paisagens mais ou menos humanizadas, nas quais se podem individualizar múltiplos tipos de habitats. Esta diversidade é o resultado, em termos contemporâneos, da existência duma acentuada variabilidade geológica, edáfica, climática, hidrológica, geomorfológica e biológica, modelada ainda por uma ancestral e intensa ação humana, exercida sobre o meio biofísico. Elemento fundamental da paisagem, a vegetação é um excelente testemunho das condições edafoclimáticas e da ação antrópica duma dada região.

O Noroeste português apresenta, pois, condições naturais excelentes para a arborização, apenas condicionadas em altitude, onde a topografia desfavorável e a diminuição da temperatura podem impor algumas restrições.

A arborização que conduziu aos atuais espaços silvestres iniciou-se já no século XX, ao abrigo do Regime Florestal (1901 a 1905) e com a criação do Plano de Povoamento Florestal de 1938 (Bento-Gonçalves, 2006).

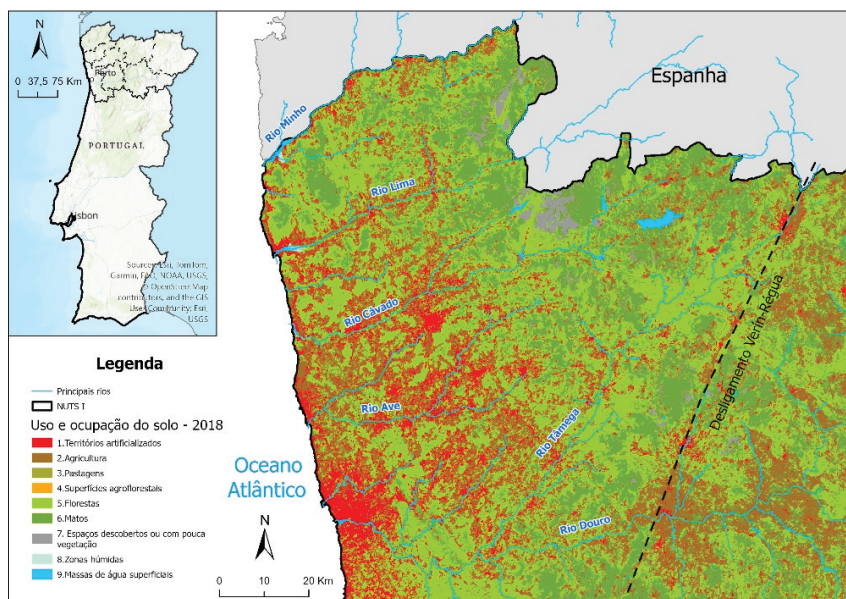


Fig. 5 - Uso do solo no Noroeste de Portugal.

Fig. 5 - Land use in Northwest of Portugal

Apesar das características e aptidões naturais deste território, a ação do ser humano (agricultura, pastoreio, silvicultura, etc.) com uma antiga e importante presença no Noroeste (elevada densidade populacional), deve ser enfatizada, dado que ao longo do tempo alterou a fisionomia do território, e, como consequência, levou à degradação ou mesmo destruição da cobertura vegetal autóctone (Pedrosa *et al.*, 2010). Por outro lado, “[...] *mesmo esta ação humana, em especial a organização de sistemas agrícolas tradicionais, esteve dependente dos mesmos fatores físicos que moldam os sistemas naturais*” (Gomes *et al.*, 2004).

Com efeito, o Noroeste de Portugal caracteriza-se por um apreciável dinamismo demográfico, sendo marcado pela ocorrência de elevadas taxas de natalidade e de nupcialidade.

Esta é uma das maiores concentrações humanas da península, e sem dúvida uma das mais antigas. O Noroeste possui uma densidade demográfica superior aos 360 hab./km² (369,1), francamente superior quer ao Norte de Portugal (175,1), quer ao do continente português (112,9). Para além desta densidade populacional, observa-se no Noroeste de Portugal uma grande dispersão do povoamento por todo o território.

Movimentos em massa no Noroeste de Portugal

O movimento em massa ocorrido em Penedo, Ventosa, no inverno de 2000/2001, foi apenas um de muitos que se desencadearam neste período em Portugal, nomeadamente no Norte e Centro de Portugal (Vieira, 2008). Às adversas condições meteorológicas registadas neste período, associaram-se outros fatores, alguns de ordem estrutural, dos quais destacamos especificamente os relacionados com o inadequado planeamento de infraestruturas e a falta de ordenamento do território.

Desde o fatídico deslizamento de Frades, em Arcos de Valdevez, ocorrido a 7 de dezembro de 2000 e que vitimou quatro pessoas (Pedrosa *et al.*, 2001), aos inúmeros movimentos de vertente que afetaram a bacia do Douro, felizmente sem vítimas mortais, mas provocando avultados danos materiais e produzindo grandes transtornos às populações afetadas (Pedrosa *et al.*, 2001; Vieira, 2008), muitos foram os fenómenos que se desencadearam naquele inverno.

Mas a ocorrência (e recorrência) destes fenómenos é significativa no Noroeste de Portugal (Zêzere *et al.*, 2014), ainda que inferior a outras regiões de Portugal continental, onde os fatores condicionantes e desencadeantes deste tipo de movimentos apresentam comportamentos diferenciados, com características mais favoráveis, ou porque a ação antrópica é aí mais ativa, quer na atuação direta, quer na interferência sobre os demais fatores.

Analisamos, assim, neste trabalho três casos de movimentos em massa que ocorreram no Noroeste de Portugal, enquadrados por condicionalismos distintos e em datas distintas, mas evidenciando, ainda que em diferente medida, a influência que o fator antrópico pode ter no seu desencadeamento.

O movimento em massa de Penedo-Ventosa (Vieira do Minho, 7 de dezembro de 2000)

O primeiro caso em análise ocorreu no lugar de Penedo, em Ventosa, localidade do concelho de Vieira do Minho, no inverno de 2000/2001. Um dos fatores que contribuiu de forma significativa para o desencadeamento deste movimento em

massa foi a precipitação que se verificou neste inverno. Como podemos constatar pela observação dos gráficos pluviométricos relativos às estações meteorológicas de Penedo (localizada próxima do local da ocorrência) e Brancelhe (Vieira do Minho) (fig. 6), desde outubro de 2000 se abateram sobre esta área significativos quantitativos de precipitação. Atendendo aos valores observados em Penedo, de setembro de 2000 a final de agosto de 2001 registaram-se 5.030,3 mm de precipitação, valor bastante elevado, mesmo para esta região do país! Entre 21 de setembro de 2000 e a data da ocorrência (17 dias) verificaram-se 675,5 mm, dos quais 436 mm nos sete dias anteriores ao movimento. No próprio dia registou-se um total de 132,5 mm de precipitação, valores que terão, certamente, favorecido uma intensa circulação da água à superfície, com elevados quantitativos de escorrência a afluir rapidamente aos cursos de água e valeiros, com elevada competência e torrencialidade.

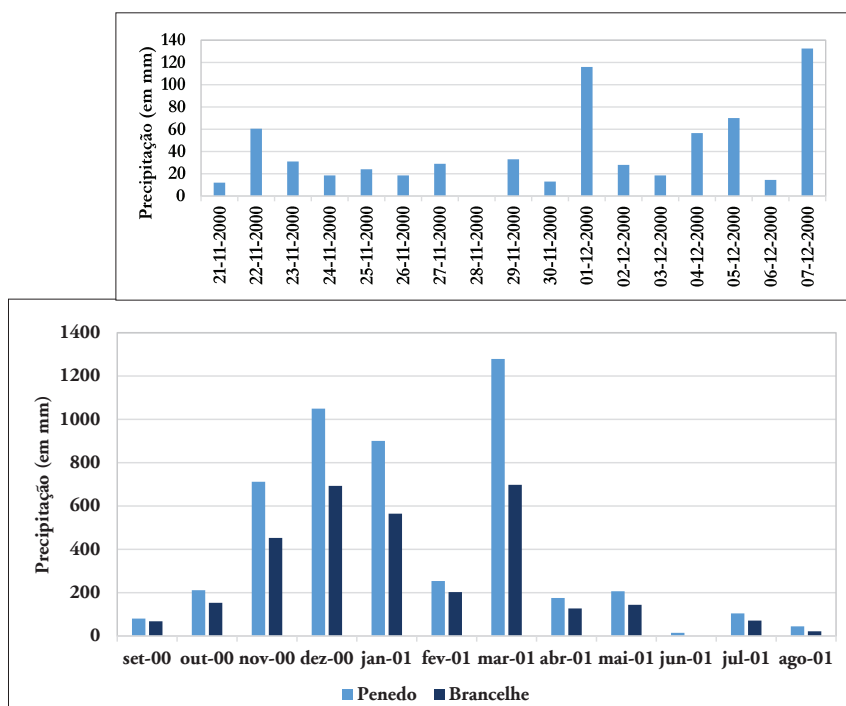


Fig. 6 - Gráfico pluviométrico mensal de Penedo e Brancelhe (2000/2001). Na caixa superior, precipitação diária de Penedo (21/11/2000 a 07/12/2000) (Fonte: SNIRH).

Fig. 6 - Monthly rainfall charts for Penedo and Brancelhe (2000/2001) and daily rainfall charts for Penedo (21/11/2000 to 07/12/2000) (Source: SNIRH).

Acrescem as condições naturais do local, constituído por um substrato granítico bastante fraturado, num local caracterizado por um relevo acidentado, facto facilmente observável no esboço hipsométrico elaborado (fig. 7) e na carta de declives (fig. 8). Com efeito, estamos na presença de vertentes que, ainda que revestidas por manchas florestais e áreas agrícolas, com ocupação humana dispersa, apresenta vertentes bastante declivosas, maioritariamente acima dos 15°, o que favorece uma rápida escorrência e maior instabilidade a essas mesmas vertentes. As linhas de água ganham, também, maior competência, especialmente quando animadas por episódios de precipitação intensa, como os que foram registados.

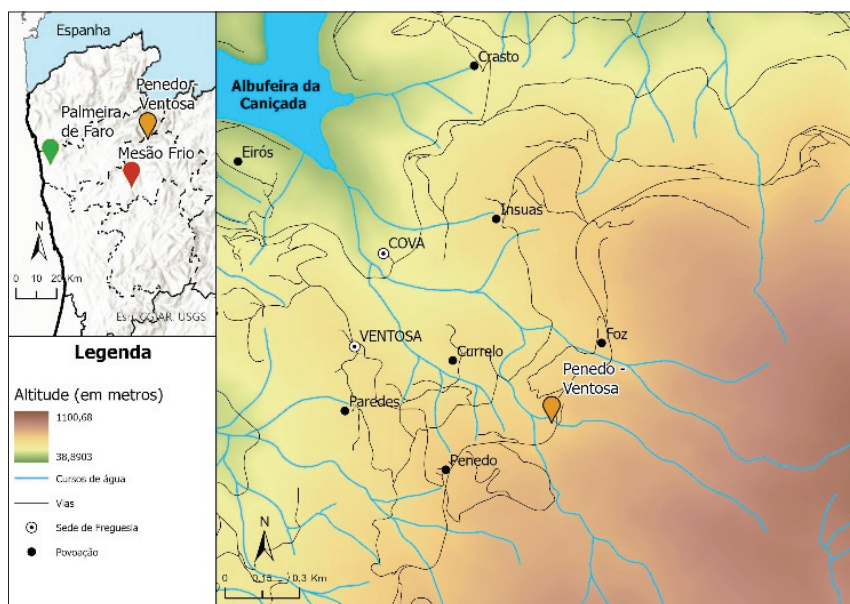


Fig. 7 - Hipsometria da área de Penedo.

Fig. 7 - Hypsometry of the Penedo area.

O movimento em massa teve, no entanto, condicionalismos antrópicos relevantes, que terão estado na sua origem. A massa de material movimentado corresponde ao entulho (material heterogéneo, composto por solo, rochas e restos de materiais de obras, trazidos de locais diversos) utilizado para a construção de um aterro, na berma desdendente da Estrada Nacional 103. Este aterro, construído com o objetivo de

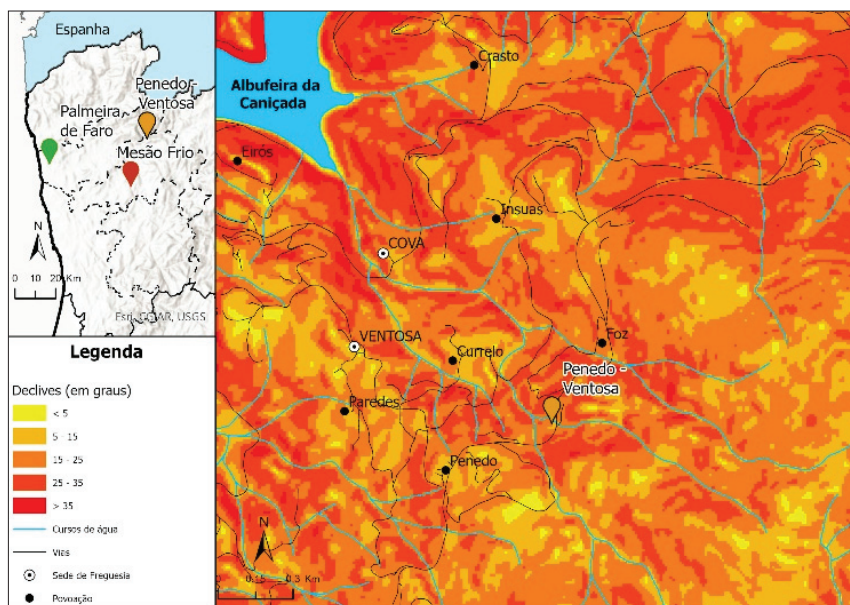


Fig. 8 - Carta de declives da área de Penedo.

Fig. 8 - Slope map of the Penedo area.

servir como parque de estacionamento, em construção já há algum tempo, estava precisamente a ser intervencionado no dia do acidente. Uma máquina retroescavadora estava a mobilizar materiais quando se deu o movimento, tendo a máquina pesada e o seu operador sido levados com o material que compunha este aterro.

De referir que o aterro foi construído exatamente num valeiro onde circulava uma linha de água, eventualmente intermitente, mas bastante ativa em períodos pluviosos intensos, como este. Uma vez que estava localizado imediatamente junto à via de circulação, deveria existir uma manilha a canalizar o valeiro, que teria sido obstruído pelo aterro e teria saturado os materiais do aterro com água da intensa precipitação que se verificou, tendo estes ultrapassado o limite de plasticidade. Um muro sem a devida drenagem, feito de blocos sobrepostos, limitava a jusante o aterro, mas não teve capacidade para sustentar o peso dos materiais saturados de água (Bateira e Abreu, 2003). O material movimentado, totalmente provenientes do aterro, aproveitou o vale da linha de água para se deslocar (fot. 1), terminando o movimento na albufeira da Caniçada, a cerca de 1600 metros de distância.



Fot. 1 - Vale por onde se movimentou o material. É possível observar no topo a cicatriz do movimento (Fotografia de Antônio Bento-Gonçalves, tirada em dezembro de 2000).

Photo 1 - Valley where the material moved. The scar from the movement can be seen at the top (Photography of Antônio Bento-Gonçalves, taken on december 20000).

Sendo certo que as condições naturais eram favoráveis à ocorrência deste fenômeno, a ação antrópica desempenhou um papel determinante na criação de condições para que este movimento pudesse ocorrer, tendo também contribuído para o seu desencadeamento.



Fig. 9 - Esboço da área afetada, com a localização do aterro e delimitação de parte do percurso percorridos pelos detritos deslocados (Fonte: Google Earth).

Fig. 9 - Location of the landfill and demarcation of part of the path taken by the displaced debris (Source: Google Earth).

O deslizamento de Mesão Frio

No dia 2 de abril de 2013 ocorreu um movimento em massa em Mesão Frio, freguesia do concelho de Guimarães, sem vítimas humanas, mas com graves constrangimentos para a circulação rodoviária.

O movimento em massa ocorreu numa vertente intervencionada antropicamente, afetando um conjunto de moradias e a variante (IC5) que liga Guimarães a Fafe.

Tal como no exemplo anterior, os fatores meteorológicos estiveram envolvidos no desencadeamento deste processo. De facto, durante o mês de março observou-se, na estação meteorológica de Braga do IPMA, um cumulativo de precipitação bastante significativo, de cerca de 346,3 mm, tendo-se mantido esta tendência nos primeiros dias de abril. O mês de março foi, inclusivamente, apontado como muito chuvoso a extremamente chuvoso, segundo o Boletim Climatológico Mensal do IPMA. Recorrendo aos dados da estação meteorológica do Departamento de Geografia da UMinho, localizada no Campus de Azurém, verificamos que de 27 de março a 3 de abril a precipitação foi constante, com valores diários quase sempre acima dos 10 mm e atingindo os 75 mm no dia 29 de março e os 70 mm no dia 2 de abril (fig. 10). Foi precisamente na sequência deste último episódio pluviométrico que se deu o movimento.

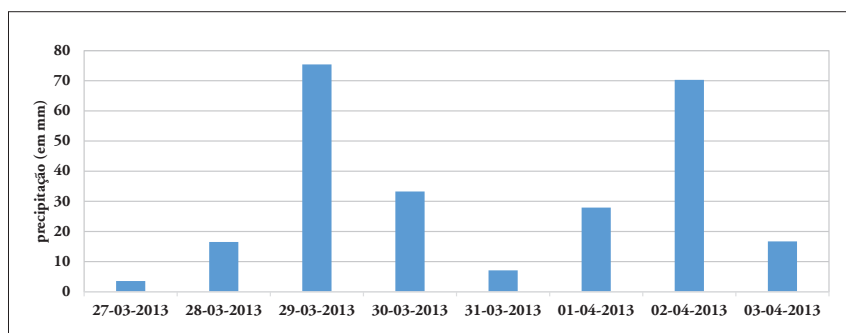


Fig. 10 - Gráfico pluviométrico com valores diários de Azurém (2013)
(Fonte: DGeo-UMinho).

Fig. 10 - Rainfall graph with daily values for Azurém (2013)
(Source: DGeo-UMinho).

As características do relevo são igualmente favoráveis à ocorrência deste fenómeno, dado estarmos na presença de vertentes com declives acentuados (fig. 11), ocupadas maioritariamente por campos agrícolas e floresta.

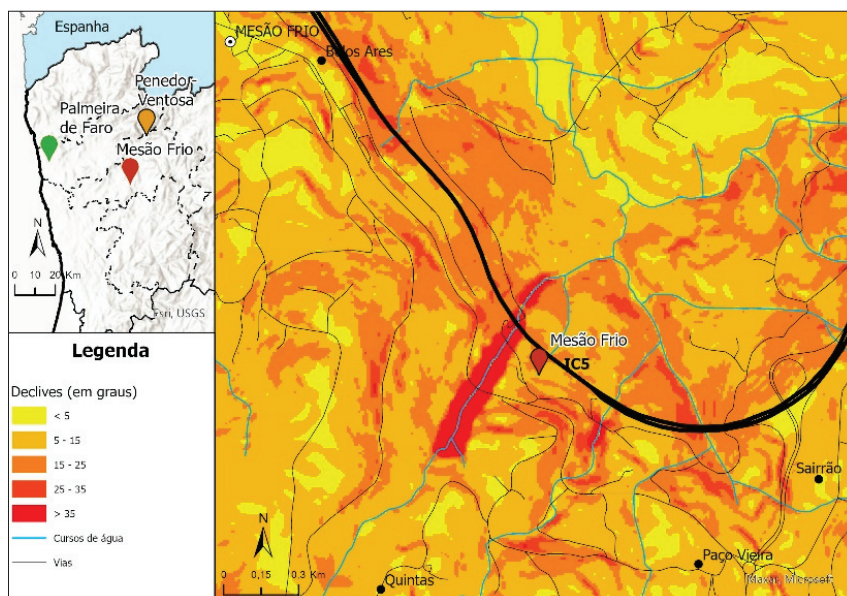


Fig. 11 - Carta de declives da área de Mesão Frio.

Fig. 11 - Slope map of the Mesão Frio area.

Também neste caso, a ação antrópica foi determinante para a ocorrência do fenómeno. O movimento em massa afetou uma urbanização, constituída por dois blocos de moradias em banda (fot. 2). Para a construção de um dos blocos foi necessário construir um aterro, que viria a colmatar um pequeno valeiro onde funcionava uma linha de água intermitente.

Tal como se pôde concluir no julgamento entretanto ocorrido, com base no relatório pericial realizado, o aterro foi construído sem estudo geotécnico prévio, tendo sido empregue solo inadequado que não oferecia estabilidade para suportar a carga da estrutura e sem as medidas de compactação e drenagem necessárias e sem um muro de suporte (construído posteriormente ao desastre).

O facto de se ter ignorado a existência de uma linha de água, ainda que intermitente, foi determinante para este desfecho desastroso. Com efeito, em virtude dos elevados quantitativos de precipitação que se verificavam já desde novembro de 2012 (valores mensais superiores a 400 e 500 mm), a infiltração de água no aterro deveria ser extremamente elevada, conduzindo à perda de consistência e consequente mobilização do material que o constituía.

Em consequência, a variante que liga Guimarães a Fafe (pela qual passam diariamente cerca de 20 mil viaturas) foi totalmente cortada por toneladas de terra, lama e rochas (cerca de 8 mil m³), com cerca de 6 metros de altura e numa extensão de aproximadamente 80 metros. A circulação esteve impedida durante duas semanas e foi aberta parcialmente nas duas semanas seguintes, até os trabalhos estarem terminados.



Fot. 2 - Moradias afetadas, podendo ver-se a estacaria em que estavam assentes, e volume de detritos provenientes do deslizamento, que se acumularam na variante Guimarães-Fafe (Fotografia de Câmara Municipal de Guimarães, tirada a 03/04/2013).



Photo 2 - Affected houses, where you can see the piling on which they were built, and the volume of debris from the landslide that accumulated on the Guimarães-Fafe road (Photography of Câmara Municipal de Guimarães, taken on 03/04/2013).

O deslizamento de Palmeira, Esposende

Às 3:55 do dia 23 de novembro de 2022, foi dado o alerta para um movimento em massa que atingiu uma moradia na freguesia de Palmeira de Faro, no município de Esposende.

Foi mobilizado para o efeito um dispositivo operacional liderado pelo Comando Distrital de Operações de Socorro de Braga (CDOS de Braga), que envolveu elementos dos Bombeiros Voluntários de Esposende, do Instituto Nacional de Emergência Médica (INEM), da Guarda Nacional Republicana (GNR), do Serviço Municipal de Proteção Civil da Câmara Municipal de Esposende, da Polícia Judiciária (PJ) e Técnicos da Universidade do Minho, num total de 43 operacionais, apoiados por 23 veículos (Vieira *et al.*, 2023).

Este movimento em massa (fot. 3) afetou diretamente duas habitações e condicionou a utilização temporária de outras habitações, provocando também a perda de vidas humanas.



Fot. 3 - Vista aérea, obtida a partir de drone, da área afetada
(Fotografia de António Vieira, tirada a 25/11/2022).

Photo 3 - Aerial view, taken from a drone, of the affected area
(Photography of António Vieira, taken on 25/11/2022).

O acompanhamento das operações de socorro permitiu-nos avaliar o movimento e os condicionantes físicos inerentes à sua ocorrência.

Tratou-se de um deslizamento translacional, acompanhado de queda de blocos, que terão sido os responsáveis pela destruição nas habitações e pelas perdas humanas. Este deslizamento terá movimentado um volume de material de cerca de 4.069 m³.

Da análise dos diversos elementos constata-se que os fatores desencadeantes deste processo são diversos e atuaram de forma interdependente. O fator climático foi, sem dúvida determinante para a ocorrência, dada a sequência longa de períodos de precipitação intensa que antecedeu o movimento. Os meses de outubro e novembro registaram elevados quantitativos de precipitação, superiores a 300 mm (fig. 12).

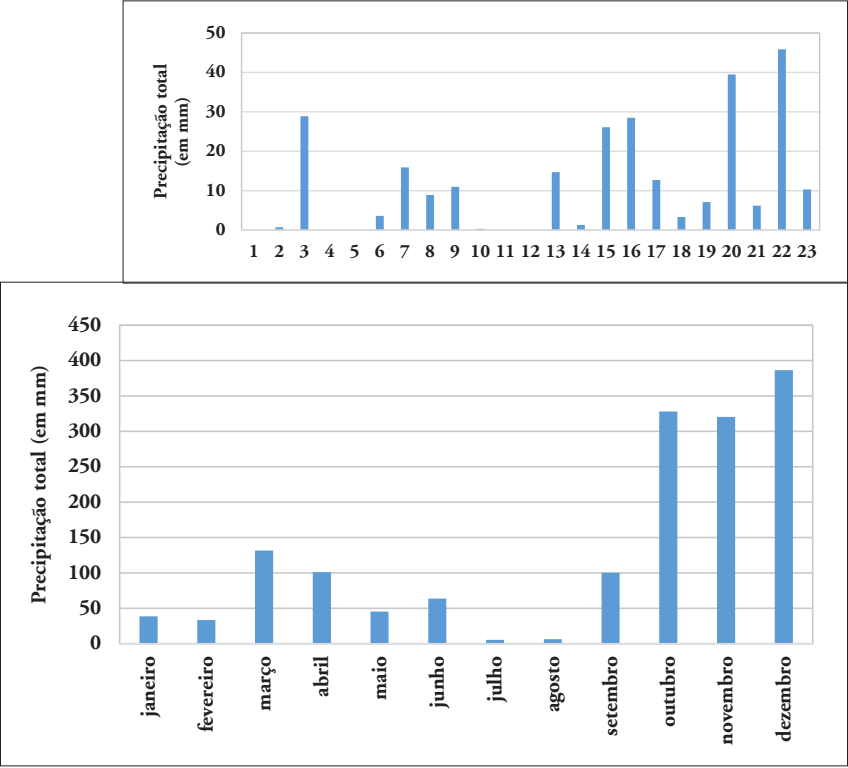


Fig. 12 - Precipitação mensal no ano de 2022. Na caixa superior, precipitação diária no mês de novembro de 2022 (Fonte: Câmara Municipal de Esposende).

Fig. 12 - Monthly rainfall in the year 2022. In the upper box, daily precipitation in November 2022 (Source: Câmara Municipal de Esposende).

De igual modo, os dias anteriores à catástrofe registaram valores de precipitação elevados: 9 dos 23 dias anteriores registaram mais de 10 mm, dos quais 5 com mais de 25 mm. O dia 22 foi o mais chuvoso, com mais de 45 mm de precipitação.

O local onde ocorreu o movimento desenvolve-se em granito porfiróide, de grão grosseiro ou grosseiro a médio, encontrando-se bastante fraturado. Aliás, a presença de múltiplas diáclases, facilmente identificáveis no corte efetuado na vertente afetada, terá facilitado o movimento (fot. 4). De facto, observava-se clara instabilidade estrutural do maciço granítico naquele local. Em virtude deste corte na vertente realizado para efetuar a construção das habitações, o seu declive era praticamente vertical. A edificação das habitações foi efetuada sem implementação de qualquer medida de segurança e de contenção de qualquer movimento ou queda de blocos que pudesse ocorrer.



Fot. 4 – Superfície de deslizamento aproveitando descontinuidade no maciço granítico. Observa-se o material suprajacente movimentado, ainda mantendo a sua estrutura geral original (Fotografia de António Vieira, tirada a 23/11/2022).

Photo. 4 – Slide surface taking advantage of a discontinuity in the granite massif. We can see the overlying material, moved, but still maintaining its original general structure (Fotografia de António Vieira, tirada a 23/11/2022).

Acresce que outras intervenções antrópicas foram realizadas naquele local. Na parte superior da vertente foi construída uma habitação de grande volumetria, tendo sido também alterada a cobertura vegetal na propriedade, eliminando-se a floresta anteriormente existente e colocado relvado e um pomar, até ao limite da propriedade, sobranceira às habitações afetadas pelo movimento.

Para além disso, no lote anexo à habitação mais afetada, e onde se verificou o principal movimento de blocos e solo, foram efetuados trabalhos de preparação para construção, em 2022, removendo o material rochoso da base da vertente (fot. 5).



Fot. 5 - Situação do talude no lote adjacente à casa afetada, evidenciando a fraturação do granito na sequência dos trabalhos de preparação para construção (Fotografia da Câmara Municipal de Esposende).

***Photo. 5** - Situation of the slope on the plot adjacent to the affected house, showing the fracturing of the granite following the preparation work for construction (Photography of Câmara Municipal de Esposende).*

Concluimos que as condições meteorológicas terão desempenhado um papel importante na ocorrência deste movimento. Para além disso, foram determinantes as intervenções de desestabilização da vertente, quer as realizadas para a construção das habitações afetadas (processo mais antigo), quer as implementadas na construção da habitação localizada na parte superior da vertente, no passado recente, e as intervenções mais recentes (ainda em 2022) de limpeza/preparação do lote localizado na base da vertente. Aspetos relacionados com a estabilidade estrutural do maciço granítico também poderão ter contribuído para o desencadear do movimento.

Uma nota final para destacar o dispositivo operacional que foi envolvido na operação de proteção civil, realçando-se a importância da integração dos diversos agentes de proteção civil e o apoio dos demais intervenientes nesta operação, nomeadamente o apoio técnico prestado pelos elementos da academia.

Conclusão

A ocorrência de desastres, de génese natural, mas com condicionantes antrópicas mais ou menos significativas, tem vindo a ser cada vez mais frequentes, resultando em destruição de bens, infraestruturas e, em muitos dos casos, na perda de vidas humanas.

Um dos desastres que com alguma frequência afeta o Noroeste de Portugal diz respeito aos movimentos em massa. Ainda que apresentem uma génese natural, constata-se que frequentemente a sua ocorrência é francamente condicionada por fatores antrópicos, como temos assistido nos casos do movimento em massa de Ventosa (Vieira do Minho), ocorrido em 2000, de Mesão Frio (Guimarães), de 2013 ou de Palmeira de Faro, no município de Esposende, no dia 23 de novembro de 2022.

Os três casos analisados neste trabalho, espelham problemas de atuação antrópica que poderão ter estado no desencadeamento destes processos ou, pelo menos, terão contribuído de forma significativa para a sua ocorrência. Se a incúria parece ter acompanhado estes acidentes nalgum momento da sua evolução, também não é descabido afirmar que, em qualquer um dos casos, podemos identificar falhas ou lacunas ao nível do planeamento: construção e obstrução de linhas de água, corte de vertentes sem implementação das adequadas medidas de proteção e, eventualmente, falhas ou omissão ao nível do licenciamento e da fiscalização.

A ação humana foi, nalgum momento destes processos, se não o agente principal, um intensificador dos processos naturais.

É fundamental a consciencialização da população, dos agentes e dos responsáveis pela edificação e pelo planeamento, para as problemáticas dos riscos naturais, nomeadamente os geomorfológicos, por forma a evitar situações de risco e ocorrência de desastres, com consequentes perdas de vidas humanas e materiais.

Bibliografia

- Bateira, C., Abreu, J. (2003). Os problemas da cartografia dos riscos naturais. Contributos para a definição da susceptibilidade geomorfológica a partir da observação de vários movimentos de vertente ocorridos no norte de Portugal. *Territorium – Revista de Geografia Física aplicada no Ordenamento do Território e Gestão de Riscos naturais*, ISSN: 0872-8941, Minerva, Coimbra, 10, 69-88. DOI: https://doi.org/10.14195/1647-7723_10_5
- Bateira, C., Soares, L. (1992). O fluxo de detritos de Cavez. Um exemplo de movimentos de massa na evolução actual das vertentes [Apresentação em comunicação]. *VI Colóquio Ibérico de Geografia, Porto, Portugal*. URL: <http://hdl.handle.net/10216/21607>
- Bateira, C., Soares, L. (1997). Movimentos em massa no norte de Portugal. Factores da sua ocorrência. *Territorium – Revista de Geografia Física aplicada no Ordenamento do Território e Gestão de Riscos naturais*, ISSN: 0872-8941, Minerva, Coimbra, 4, 63-77. DOI: https://doi.org/10.14195/1647-7723_4_6
- Bateira, C., Soares, L., Rodrigues, D., Moura, R., Teixeira, M., Santos, M. (2014). Movimentos de vertente no Norte de Portugal: importância do comportamento hidrológico das formações superficiais. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 15(4), 551-565.
- Bento-Gonçalves, A. (2006) A “Construção” e a “Desconstrução” do património florestal português no Séc. XX – breve abordagem ao caso do concelho de Vieira do Minho. Núcleo de Investigação em Geografia e Planeamento; Universidade do Minho. *Geo-Working Papers*; Série Investigação 2006/8. Guimarães
- Bento-Gonçalves, A. (2023) Riscos Naturais em Portugal. In P. Chamusca e A. Bento-Gonçalves (Eds.), *Os Desafios (Geográficos) da Governação Territorial*. UMinho Editora/CECS. 61-83. DOI: <https://doi.org/10.21814/uminho.ed.70.5>
- Braga, M. A. S. (1988). *Arenas e depósitos associados da bacia de drenagem do rio Cavado (Portugal). Contribuição para o estudo da arenização (Tese de Doutoramento)*. Universidade do Minho, Braga, 325 p.
- Costa, F. S. (2008). *A Gestão das Águas Públicas: o caso da bacia hidrográfica do rio Ave no período 1902-1973 (Dissertação de Doutoramento em Geografia – Ramo de Geografia Física e Estudos Ambientais)*. Universidade do Minho. URL: <http://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/8871>
- Daveau, S. (1985). Mapas Climáticos de Portugal – Nevoeiro e Nebulosidade, Contrastes Térmicos, *Memórias*, nº 7, C.E.G. Lisboa, 95 p.
- Ferreira, N., Iglesias, I., Noronha, F., Pereira, E., Ribeiro, A., Ribeiro, M. L. (1987) - Granitóides da Zona Centro Ibérica e seu enquadramento geodinâmico. *Libro Homenage a L. C. García de Figueirola*, Ed. Ruela, Madrid, 37-51.
- Gomes, P. T., Botelho, A. (2004). Minho, Unidade Biogeográfica?. *Área*, 4, GeoPlanUM, Guimarães, 47-58.
- Lema, P. B., Rebelo, F. (1996). *Geografia de Portugal, Meio Físico e Recursos Naturais*, Universidade Aberta, 447 p.
- LNEC - LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL (1996). Instalação de uma Monobóia para Descarga de Petróleo Bruto para a Refinaria do Porto, Caracterização das Condições Naturais – Relatório Final. *Relatório 172/96* – NPP, Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- Pedrosa, A. (1994). As actividades humanas e os processos morfogenéticos. O exemplo da serra do Marão. *Territorium – Revista de Geografia Física aplicada no Ordenamento do Território e Gestão de Riscos naturais*, ISSN: 0872-8941, Minerva, Coimbra, 1, 23-34. DOI: https://doi.org/10.14195/1647-7723_1_3

- Pedrosa, A., Bateira, C., Soares, L. (1995). Covelo do Gerês: contributo para o estudo dos movimentos de massa no norte de Portugal. *Territorium – Revista de Geografia Física aplicada no Ordenamento do Território e Gestão de Riscos naturais*, ISSN: 0872-8941, Minerva, Coimbra, 2, 21-32.
DOI: https://doi.org/10.14195/1647-7723_2_3
- Pedrosa, A. S., Gonçalves, A. B., Vieira, A. B., Costa, F. S. (2010). *Livro-guia da viagem de estudo ao litoral norte e serras do noroeste português*. Departamento de Geografia da Faculdade de Letras da Universidade de Coimbra e Centro de Estudos em Geografia e Ordenamento do Território, Coimbra, 87 p. URL: <http://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/13939>
- Pedrosa, A. S., Lourenço, L., Felgueiras, J. (2001) Movimentos em massa. Exemplos ocorridos no Norte de Portugal. ENB, *Revista Técnica e Formativa da Escola Nacional de Bombeiros*, 25-39.
- Pedrosa, A., Marques, B. (1994). Ação antrópica e erosão da vertente. Estudo de caso da bacia hidrográfica do rio Tâmega (1981). *Territorium – Revista de Geografia Física aplicada no Ordenamento do Território e Gestão de Riscos naturais*, ISSN: 0872-8941, Minerva, Coimbra, 1, 35-41.
DOI: https://doi.org/10.14195/1647-7723_1_4
- Pereira, S., Santos, P. P., Zêzere, J. L., Tavares, A. O., Garcia, R. A. C., & Oliveira, S. C. (2020). A landslide risk index for municipal land use planning in Portugal. *Science of The Total Environment*, 735, 139463. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139463>
- Ribeiro, O. (1986). *Portugal o Mediterrâneo e o Atlântico*, João Sá da Costa, 4ª (1998 - 7ª ed.), 188 p.
- Santos, J. (2004). Movimentos de vertente, análise de risco e ordenamento do território; o exemplo recente do fluxo deslizante de Armamar (Douro vinhateiro, Portugal). *Territorium – Revista de Geografia Física aplicada no Ordenamento do Território e Gestão de Riscos naturais*, ISSN: 0872-8941, Minerva, Coimbra, 11, 21-44. DOI: https://doi.org/10.14195/1647-7723_11_3
- Soares, L., Bateira, C. (2013). Movimentos de massa em vertentes no Norte de Portugal. Retrospectiva e actualização. *Riscos naturais, antrópicos e mistos: Homenagem ao Professor Doutor Fernando Rebelo*, 367-383.
- Vieira, A. (2008). *Serra de Montemuro: dinâmicas geomorfológicas, evolução da paisagem e património natural*. (Diss. Doutoramento). FLUC, Coimbra, 689 p. <http://hdl.handle.net/10316/9006>
- Vieira, A.; Bento-Gonçalves, A.; Melo, J.; Costa, R. (2023) O movimento em massa de Palmeira de Faro (Esposende), de 23 de novembro de 2022. Livro de resumos do VI Congresso Internacional de Riscos (pp. 176). RISCOS (Associação Portuguesa de Riscos, Prevenção e Segurança). https://vicir.riscos.pt/wp-content/uploads/2023/05/eBook_Resumos_VICIR.pdf
- Vieira, A., Carvalho, I., Bento-Gonçalves, A., Rocha, J. (2020). Riscos geomorfológicos e suas manifestações. In L. Lourenço e A. Vieira (Eds.), *Catástrofes Naturais. Uma abordagem global*, volume 7, série “Riscos e Catástrofes, Imprensa da Universidade de Coimbra. 119-167.
DOI: https://doi.org/10.14195/978-989-26-1936-1_5
- Zêzere, J. L., Pereira, S. S., Santos, P. P. (2020). A Century and Half of Hydrogeomorphological Disasters in Mainland Portugal. In *Advances in Natural Hazards and Hydrological Risks: Meeting the Challenge* (pp. 3–6). Springer Nature. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-34397-2_1
- Zêzere, J. L., Pereira, S., Tavares, A. O., Bateira, C., Trigo, R. M., Quaresma, I., Santos, P. P., Santos, M., & Verde, J. (2014). DISASTER: a GIS database on hydro-geomorphologic disasters in Portugal. *Natural Hazards*, 72(2), 503–532. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11069-013-1018-y>

PARTE II:
MOVIMENTOS EM
VERTENTES NO
BRASIL

**PROPOSTA METODOLÓGICA DE REGIONALIZAÇÃO
MUNICIPAL PARA GERENCIAMENTO DE RISCOS
DECORRENTES DE ESCORREGAMENTOS:
APLICAÇÃO NO MUNICÍPIO DE GUARUJÁ,
SÃO PAULO/BRASIL**

**METHODOLOGICAL PROPOSAL FOR MUNICIPAL
REGIONALIZATION FOR MANAGING RISKS
ARISING FROM SLIDES: APPLICATION IN THE
MUNICIPALITY OF GUARUJÁ, SÃO PAULO/BRAZIL**

Jozzefer Vincov

Defesa Civil do Município de Guarujá (Brasil)
ORCID: 0000-0003-3828-3790 jvincov@alumni.usp.br

Edilson Pizzato

Instituto de Geociências – Universidade de São Paulo (Brasil)
ORCID: 0000-0002-8714-7771 pissato@usp.br

Márcio Roberto Magalhães de Andrade

Cemaden - Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais (Brasil)
ORCID: 0000-0002-1293-7007 marcio.andrade@cemaden.gov.br

Resumo: Neste trabalho é apresentada uma proposta de regionalização municipal visando uma maior eficácia no gerenciamento de risco a escorregamentos utilizando atributos físicos do município, dados de escorregamentos e dados de pluviômetros automáticos. A regionalização tem por objetivo emitir alertas individuais para determinadas regiões do município e não para todo o município como é hoje realizado durante o Plano Preventivo de Defesa Civil (PPDC). A proposta de regionalização objetiva a redução do tempo de resposta e aumento da efetividade na ação de socorro. O método foi aplicado no município de Guarujá, litoral do Estado de São Paulo, Brasil. Como resultado o município foi compartimentado

em 5 regiões, sendo as regiões 3 e 4, os mais suscetíveis e vulneráveis para eventos pluviométricos extremos, em função de registarem altas taxas de escorregamentos. O trabalho contribuiu diretamente para as ações de Defesa Civil, ordenamento e planejamento do território, sobretudo para a gestão do risco de movimentos de massa no município de Guarujá. As informações obtidas foram incorporadas pela Defesa Civil do município, na operação no período chuvoso, e permitirá uma atuação focada na região de maior acumulado de chuva auxiliando em uma melhor performance das equipes nas vistorias de campo.

Palavras-chave: Regionalização Municipal, Guarujá, movimentos de massa, gestão do risco.

Abstract: This work presents a proposal of municipal regionalization aiming at greater effectiveness in the management of risk to landslides using physical aspects of the municipality, landslide data, and data from automatic rain gauges. The regionalization is intended to issue individual alerts to certain regions of the municipality and not to the entire municipality, as currently happens during the Civil Defence Preventive Plan (CDPP). The method was applied in the municipality of Guarujá, on the coast of the State of São Paulo, Brazil. As a result, the municipality was divided into 5 regions, with regions 3 and 4 being the most susceptible and vulnerable to extreme rainfall events, due to high rates of landslides. The work contributed directly to the actions of Civil Defence, and planning of the territory, especially to managing the risk of mass movements in the municipality of Guarujá. The information obtained was incorporated by the Civil Defence of the municipality, in the operation in the rainy season, and will allow a focused action in the region of greater rain accumulation, thereby helping towards a better performance of the teams in the field surveys.

Keywords: Municipal Regionalization, Guarujá, mass movements, risk management.

Introdução

Para enfrentamento dos desastres ocasionados pelos escorregamentos, a Defesa Civil municipal dispõe de diversos instrumentos de monitoramento meteorológico utilizadas durante o Plano preventivo de Defesa Civil (PPDC). O município conta com uma vasta cobertura de pluviômetros automáticos que estão localizados em áreas suscetíveis a escorregamentos e inundações. Dispõe ainda de imagens de satélites para acompanhamento em tempo real, como a Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica (REDEMET). Outra ferramenta constitui a rede observacional do Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais (CEMADEN), por meio dos mapas interativos, que auxilia no acompanhamento das chuvas em tempo real em cada área da cidade.

Apesar do avanço tecnológico, ainda existem dificuldades a serem sanadas como por exemplo, os avisos de riscos que são emitidos para os órgãos municipais. Devido às dimensões do município e da distribuição irregular das chuvas, os avisos chegam com um lapso temporal maior do que se esperava, ou seja, muitas vezes a Defesa Civil recebe o aviso meteorológico quando a chuva já está ocorrendo há alguns minutos ou horas, ou até mesmo quando já acabou a precipitação, dificultando assim as ações de resposta necessárias.

A proposta de regionalização objetiva a redução do tempo de resposta e aumento da efetividade na ação de socorro e, como consequência, uma possível economia de gastos para o município. A entrada em estado de atenção para escorregamentos gera um impacto ao município, tanto no acréscimo no ordenamento de despesas, mas principalmente, quanto ao tempo resposta e ação de socorro. Atualmente, quando o município entra em estado de atenção no PPDC, as despesas são potencializados em virtude da necessidade de aumento do efetivo, veículos, alimentação dos funcionários, entre outros. O motivo principal para o aumento dos gastos consiste em uma gestão inadequada do risco, que por sua vez está relacionada com a ausência do domínio da distribuição das áreas de risco no território municipal.

Também é necessário entender como a distribuição das chuvas ocorre dentro do município, em relação às áreas de risco, e ao relevo. Em função da área de estudo ser uma região costeira, observa-se uma maior recorrência de chuvas intensas

distribuídas de maneira irregular e com maior intensidade com o passar dos anos devido às mudanças climáticas. No atual PPDC, as mudanças de estado, como por exemplo, de atenção para observação, são deflagradas com a elevação da pluviosidade em qualquer setor do município. Assim, uma chuva localizada eleva o estado do plano para todo o município. Por outro lado, cada região apresenta particularidades devido aos diferentes padrões de relevo, litologia e dinâmica na ocupação da encosta e devem ser tratadas de forma distinta na análise da suscetibilidade, perigo e risco.

O município de Guarujá está localizado na Região Metropolitana da Baixada Santista, na Ilha de Santo Amaro (fig. 1). Sua área territorial é de aproximadamente 144 km², com uma população de 320 mil habitantes e uma densidade demográfica de 2.026,8 hab/km² (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2019). Seus limites compreendem a cidade de Bertioga a nordeste, Paranapiacaba ao norte, Cubatão a noroeste, Santos e São Vicente a oeste.

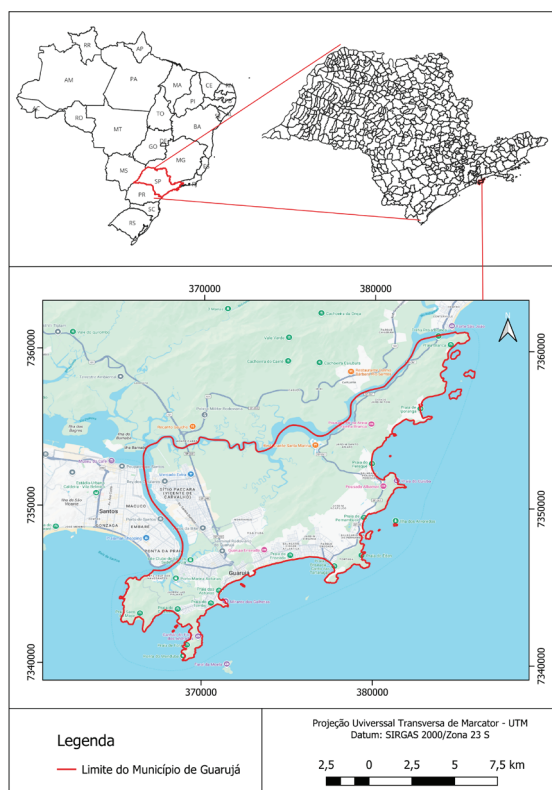


Fig. 1 - Localização da área do estudo.

Fig. 1 - Site of the study area.

O município apresenta altas taxas pluviométricas anuais e alta ocupação desordenada tendo como consequência a ocorrência de escorregamentos com frequência na região.

Dentre as centenas de escorregamentos ocorridos no município de Guarujá, destacam-se três eventos recentes. O primeiro é o escorregamento ocorrido em 25 de maio de 2005, no qual houve uma precipitação total de 128 mm em 6 horas, volume equivalente a duas vezes a média do mês na região. O local mais afetado neste evento foi o morro da Vila Baiana, deflagrando um movimento de massa de aproximadamente mil metros cúbicos, mobilizando solo, rocha e vegetação, causando a destruição de aproximadamente 10 moradias e vitimando 2 pessoas.

O segundo evento que se destaca foi o escorregamento ocorrido em 24 fevereiro de 2009 na região da Vila Baiana, o qual resultou em óbito de 2 pessoas. Na ocasião, a pluviometria que incidiu sobre o município foi de 109,4 mm em 24 horas.

Já o evento de maior impacto, ocorreu em 02 de março de 2020, onde uma chuva de forte intensidade atingiu o município, resultando em acumulados pluviométricos de 282 mm em apenas 12 horas e de 385,8 mm em 72 horas (Abreu *et al.*, 2022). Essa precipitação intensa ocasionou 159 escorregamentos na região, resultando em 32 óbitos nas diversas áreas de risco.

Método

Para estabelecer a regionalização do município com base na distribuição das áreas de risco foram realizadas as seguintes etapas (fig. 2):

- a) Diagnóstico das ocorrências de escorregamento, das áreas de risco existentes e estações de monitoramento de chuvas;
- b) Correlacionamento destas informações com os atributos físicos do território (geologia, geomorfologia);
- c) Delimitação das regiões com base em características geográficas, distância dos pluviômetros e áreas de risco geológico, além da logística das regiões de monitoramento e alertas, prevenção e proteção civil.

Para desenvolvimento do método foram utilizadas as seguintes ferramentas:

- a) Levantamento dos atributos físicos do município: geologia, geomorfologia;
- b) Inventário de ocorrência de deslizamentos;
- c) Levantamento dos registos pluviométricos e da rede de pluviômetros automáticos.

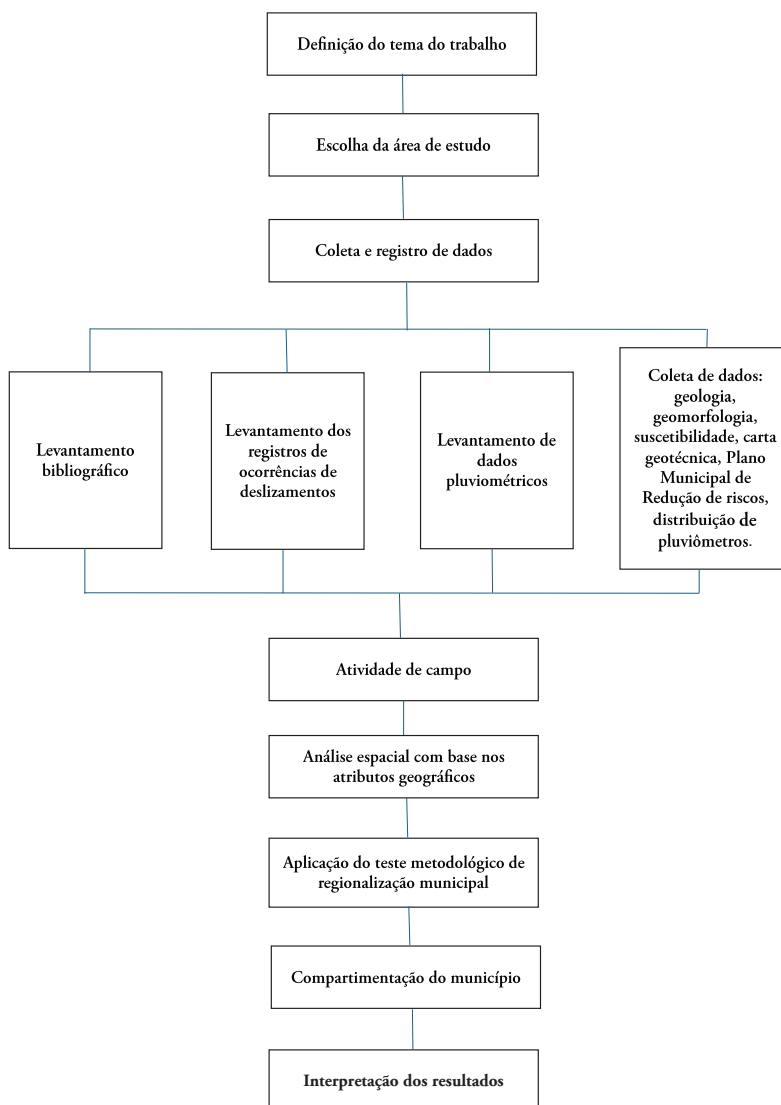


Fig. 2 - Fluxograma das atividades desenvolvidas.

Fig. 2 - Flowchart of the activities developed.

De forma a observar a variabilidade do clima na região de estudo, foi realizado o levantamento da série histórica da precipitação pluviométrica diária, mensal e anual que representa determinado local. Com isso, foram selecionados 17 postos pluviométricos com mais de 20 anos de dados (1998-2021).

Os dados foram organizados em banco de dados do Excel. Para a caracterização de limiares pluviométricos diários no município de Guarujá, optou-se por utilizar apenas os dados de um posto determinado (Perequê E3-043). A escolha foi motivada em função de ser o mais representativo, estar localizado próximo às áreas de risco geológico e não apresentar falha nas medições diárias. Destaca-se que a precipitação varia para cada região do município, e diante disso, os dados dos pluviômetros automáticos remetem-se de 2013 até o presente, com pequenas falhas de medições, como por exemplo, ausência de dados diários. Com isso, para substituir as falhas, foram adotados dados de pluviômetros mais próximos com um raio de até 2 quilômetros de distância, pois entende-se como uma maneira mais adequada e segura de substituição de dados.

Para levantamento de registro de ocorrência de escorregamentos foram analisados os laudos técnicos de escorregamentos apresentados pela Defesa Civil de 1998 até 2021, que foram compilados tratados e organizados em planilha Excel contendo as informações para caracterizar cada região do município. Os escorregamentos foram georreferenciados por coordenadas e inseridos em um Sistema de Informações Geográficas (SIG) mais especificamente na plataforma ArcGIS versão 10.5. Os dados vetoriais foram organizados em shapefile. Depois disso, foi feita a distribuição espacial da densidade dos escorregamentos com base nos arquivos vetoriais gerados por meio da ferramenta Densidade de Kernel, que calcula a densidade das feições, como ponto, a partir de um raio estabelecido, que neste caso optou-se por utilizar um raio de 500 metros quadrados em razão da escala e representatividade.

Essas informações foram correlacionadas com as características do meio físico do município: geologia, geomorfologia, suscetibilidade, PMRR e distribuição dos pluviômetros.

Após a identificação e mapeamento das características anteriormente descritas foi realizada a etapa de campo com objetivo de checagem e delimitação mais precisa das unidades.

Características físicas do município

Geologia

As rochas predominantes na região do Município de Guarujá são migmatitos estromatíticos e oftálmicos com porções xistosas e/ou gnáissicas que formam o maciço que sustenta a Serra de Santo Amaro e morros adjacentes. As demais áreas possuem uma grande cobertura por sedimentos arenosos do Quaternário, de origem marinha e mista (fig. 3).

As estruturas metamórficas podem influenciar a estabilidade dos taludes, pois esses elementos planares constituem planos de fraqueza que podem condicionar a formação de superfícies de rupturas quando posicionados de forma desfavorável em relação aos cortes executados nos taludes. Esse tipo de estrutura torna ainda mais suscetíveis os terrenos a eventos de escorregamentos, quando submetidos à ação das águas de superfície e de subsuperfície, pois formam planos preferenciais de percolação. Por outro lado, quando as estruturas residuais da rocha, e reliquias em solos estruturados, estão voltadas para “dentro do talude”, a resistência do terreno tende a aumentar. Outros fatores que influenciam a ocorrência de escorregamentos são: a geomorfologia, o clima, a infraestrutura urbana e os tipos de intervenção antrópica (IPT, 2016).

Geomorfologia

O município de Guarujá situa-se na Planície Litorânea Santista, apresentando um sistema de relevo de Planícies Costeiras e Morros Isolados (fig. 4).

A Ilha de Santo Amaro está localizada na Província Costeira, como denominada por Almeida (1964). A Província Costeira abrange a área do Estado de São Paulo a qual é drenada diretamente para o mar, constituindo o rebordo do Planalto Atlântico. Ainda assim, é considerada em maior porção, uma região serrana contínua que, a beira-mar cede lugar a uma sequência de planícies de diversas origens mais próximas ao sul do estado. À vista disto, Almeida (1964) dividiu esta província em duas zonas, a Serrania Costeira e as Baixadas Litorâneas.

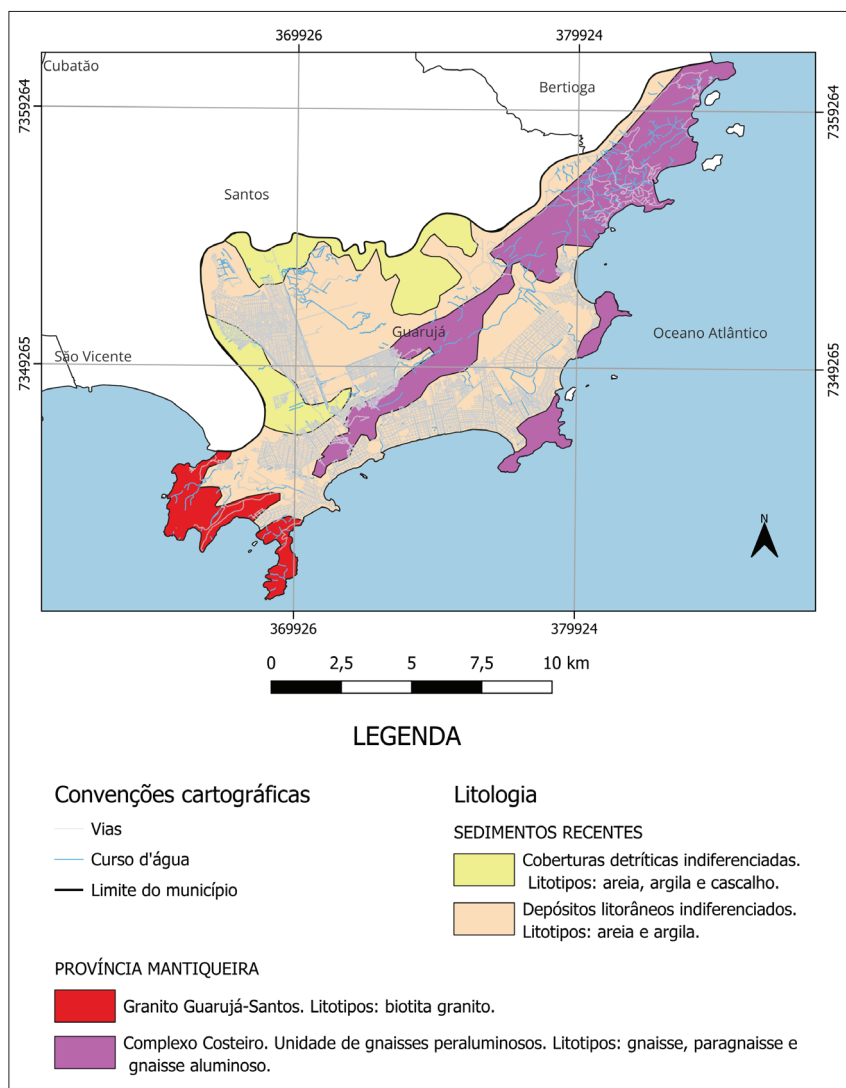


Fig. 3 - Mapa geológico do município de Guarujá (Modificado de Perrota *et. al.*, 2005).

Fig. 3 - Geological map of the municipality of Guarujá (Modified from Perrota *et. al.*, 2005).

Destacam-se dois domínios geomorfológicos principais: a Planície Costeira e os Maciços e morros isolados.

Segundo IPT (2016), as principais características geotécnicas intervenientes nos fenômenos de movimento de massa estão relacionadas aos depósitos de tálus, acumulados no sopé ou em saliências e reentrâncias à meia encosta, com declividade, espessura e extensão variadas, em função da morfologia do vale. São constituídos por blocos e fragmentos de rocha alterada, em matriz argilo-arenosa e areno-argilosa. Os terrenos apresentam-se altamente instáveis frente a modificações da geometria, principalmente de sua porção basal e, também, frente a alterações no sistema de infiltração e circulação de águas. São identificadas ocorrências de fenômenos erosivos, rolamento e queda de blocos superficiais por descalçamento e escorregamentos.

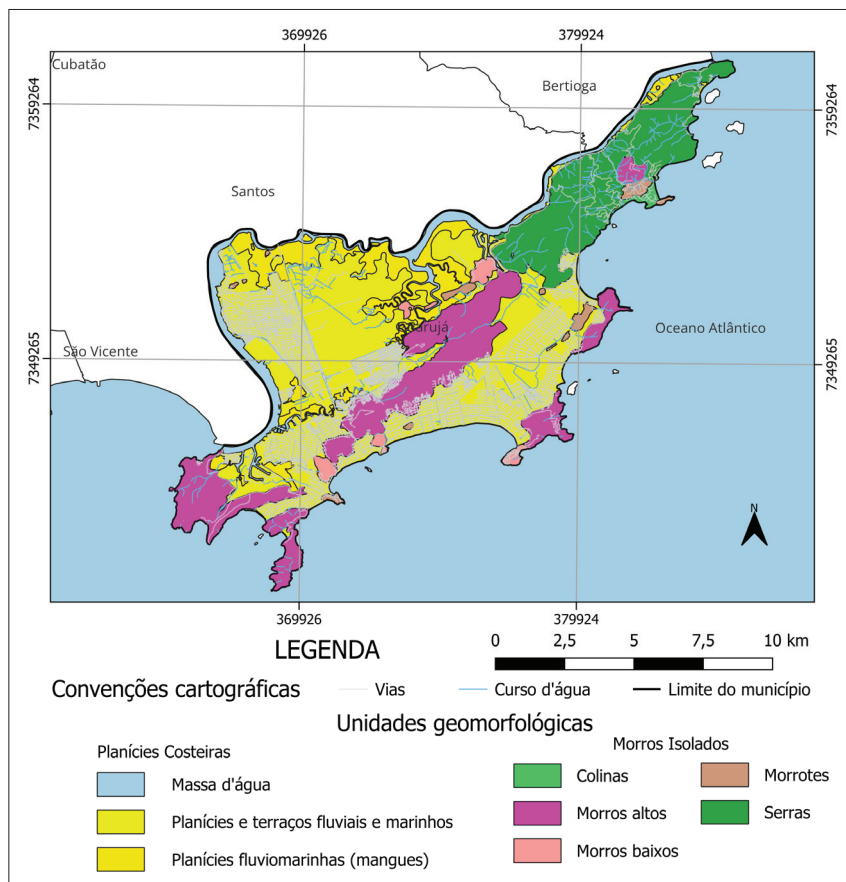


Fig. 4 - Mapa geomorfológico do município de Guarujá (Fonte: IPT, 1981).

Fig. 4 - *Geomorphological map of the municipality of Guarujá (Source: IPT, 1981).*

Os maciços isolados apresentam encostas com alta declividade com ocorrência de escorregamentos planares rasos e, mais raramente escorregamentos circulares.

Em ambas as feições, as ocupações nem sempre são efetuadas da mesma maneira, o que acarretam em muitas situações de prejuízos irreversíveis para o meio ambiente. As modificações que ocorrem na paisagem são tanto um produto natural da evolução da encosta, como erosão, escorregamentos, intemperismo, como também da ação antrópica, através do desmatamento, corte da encosta, ocupação, aterro de mangues e rios.

O número de morros e maciços em Guarujá totalizam 22, sendo que em 3 deles, designadamente Serra do Guararu, Sorocutuba e Serra de Santo Amaro, localizam-se 10 áreas de risco.

Pluviometria

O histórico pluviométrico do município foi desenvolvido a partir do banco de dados da Proteção e Defesa Civil de Guarujá, utilizando dois pluviômetros manuais do Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo (DAEE) e 13 pluviômetros do CEMADEN, porém optou-se por utilizar o pluviômetro manual denominado “Pereque E3-043” do DAEE, pois o mesmo abarca o período de dezembro de 1998 até os dias atuais, enquanto os pluviômetros automáticos compreendem o período de 2013 até o presente. As análises foram baseadas em planilhas de dados pluviométricos com um registo total de 24 anos, sendo observados dados diários, mensais e anuais (1998-2021).

Os acumulados pluviométricos foram separados a cada 9,9 mm. Por sua vez, dos 8431 dias analisados, 3083 apresentaram dados de chuva, ou seja, eventos acima de 1,0 mm. Sendo assim o município de Guarujá apresenta uma média de chuva anual de 140 dias.

O município de Guarujá apresenta uma pluviosidade média anual acima de 2000 milímetros (fig. 5), destacam-se os anos de 2010, 2015 e 2019 os quais registaram acumulados acima da média, totalizando, 2845,7 mm, 2637,4 mm e 2763,6 mm respetivamente.

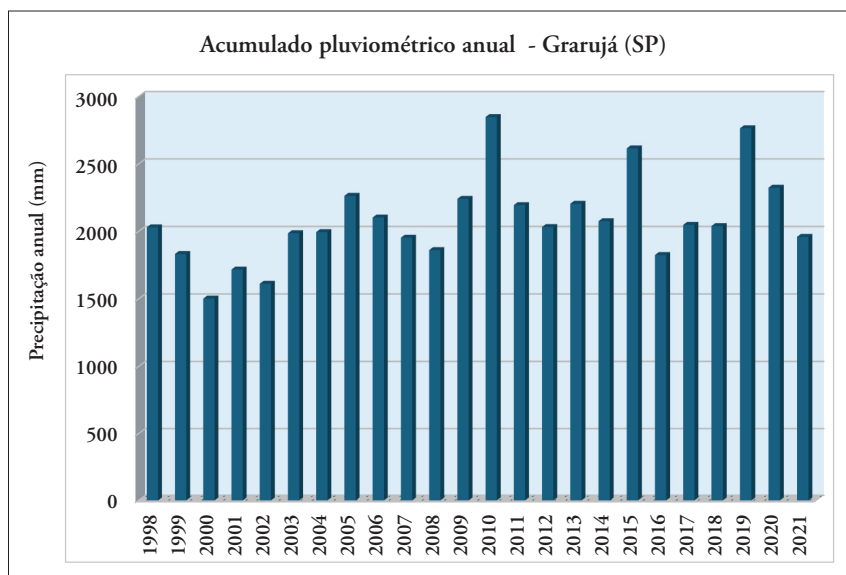


Fig. 5 - Pluviometria média anual do município de Guarujá, SP entre 1998-2021
(Fonte dos dados: DAEE, 2024).

Fig. 5 - Average annual rainfall in the municipality of Guarujá, SP between 1998-2021
(Data Source: DAEE, 2024).

A pluviosidade com maiores índices registrados compreende o período do verão (fig. 6), entre os meses de dezembro a março, registrando acumulados superiores a 200 milímetros por mês, com ênfase para o mês de janeiro que registra médias de 312,2 mm. O período de estiagem no município ocorre no período do inverno, registrando médias inferiores a 150 milímetros por mês, em destaque o mês de agosto que registra apenas 126,1 mm.

A observação dos eventos de chuva acumulada em 24 horas no período de 22 anos permite identificar que ao longo de 1 ano o município de Guarujá registrou 134 dias de chuva, sendo 72 dias de chuva fraca (CFR), 43 de chuva moderada (CM), 15 de moderada forte (CMF) e 4 dias de chuva forte (CF) em até 24 horas. Os eventos de CMF e CF requer uma atenção redobrada da Defesa Civil de Guarujá, visto que estes acumulados são passíveis de desencadear ocorrências de escorregamentos e inundações. Desta forma, 51% dos eventos de CMF e CF (≥ 30 mm < 69,9 mm) e (≥ 70 mm), sendo respectivamente, 7 e 4 dias, ocorrem durante

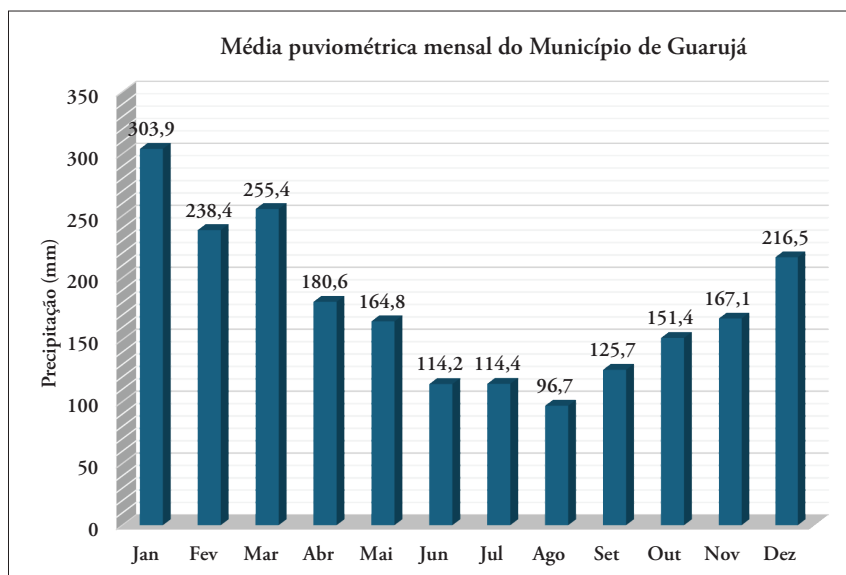


Fig. 6 - Pluviometria média mensal do município de Guarujá, SP entre 1998-2020
(Fonte dos dados: DAEE, 2024).

*Fig. 6 - Average monthly rainfall in the municipality of Guarujá, SP between 1998-2020
(Data Source: DAEE, 2024).*

o Plano Preventivo de Defesa Civil, ou seja, dezembro, janeiro, fevereiro e março. Ainda assim, realizando análises em conjunto com os técnicos da Defesa Civil local, tem-se observado um aumento na ocorrência de chuvas fortes (>70 mm) em até 24 horas, devido às mudanças climáticas. A partir disto, foi possível traçar uma linha de tendência de previsão linear que aponta os anos subsequentes com uma média de 4 a 5 dias de chuva forte em apenas um ano.

Áreas de risco

O principal risco geológico que ocorre no município de Guarujá está relacionado com a possibilidade de escorregamentos planares, conforme classificação de Varnes (1978), em áreas densamente ocupadas nas encostas dos relevos mais acidentados (fot. 1).



Fot. 1 - Morro do Vale da Morte. Ocupações na base da encosta, padrões construtivos variados (Fonte: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 2016).

***Photo 1** - Death Valley Hill. Occupation of land at the base of the slope, varied construction patterns (Source: Institute of Technological Research, 2016).*

O município possui 17 áreas de risco geológico cadastradas, sendo 13 classificadas como área de Risco Alto – R3 (fig. 7). As áreas de Risco Muito Alto–R4, ou seja, aquelas onde o risco é considerado iminente, não estão apontadas uma vez que são indicadas para remoção imediata.

Por sua vez, as áreas de baixo ou médio risco foram classificadas como “Setor de Monitoramento”. Neste setor não é possível observar indícios de movimentação, como por exemplo, trincas ou rachaduras no terreno e na moradia ou degraus de abatimento. Porém, caso seja realizada intervenções antrópicas neste local, a classificação do setor pode se modificar e passando área de risco alto ou muito alto.

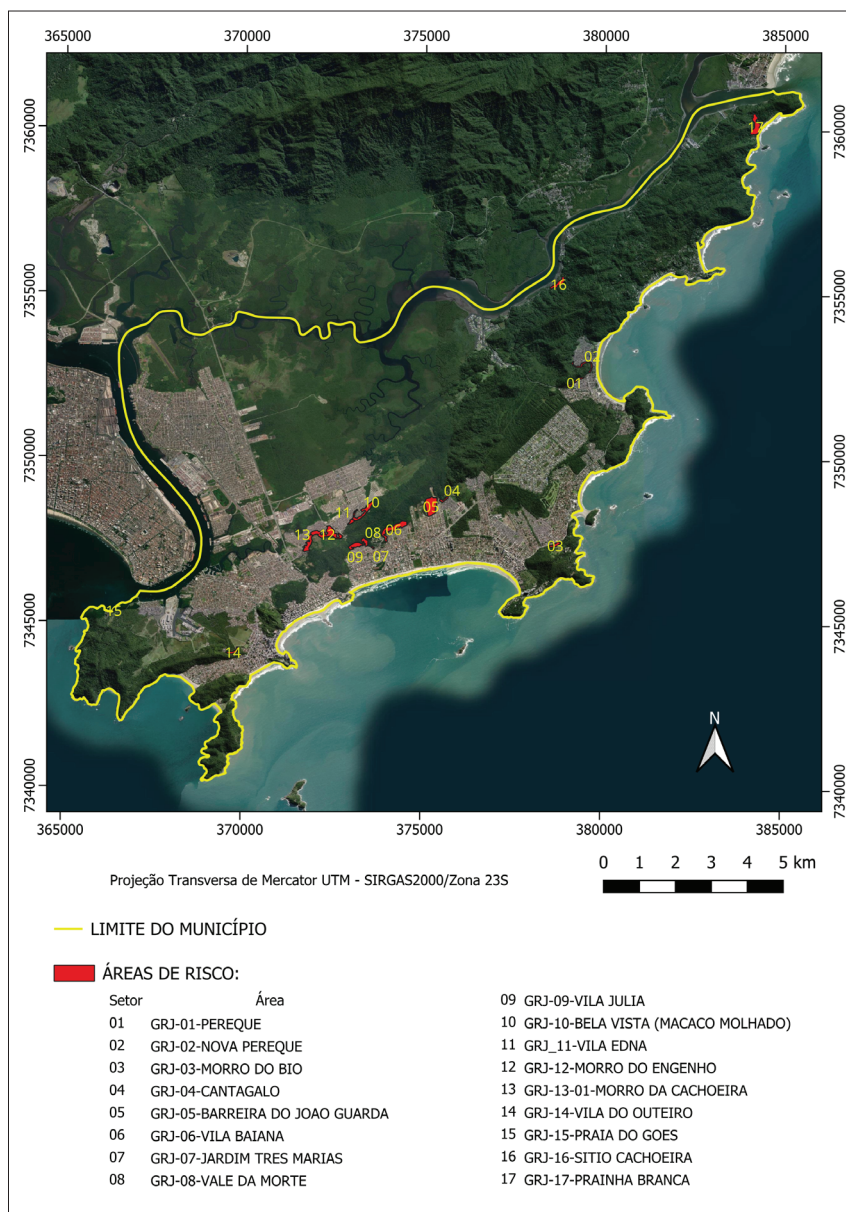


Fig. 7 - Áreas de risco geológico do município de Guarujá
(Fonte dos dados: Defesa Civil do Guarujá).

Fig. 7 - Areas of geological risk of the municipality of Guarujá
(Data source: Civil Defense of Guarujá).

Resultados

Rede pluviométrica

Dos pluviômetros instalados no município, 2 são manuais e pertencentes DAEE e 13 automáticos pertencentes ao CEMADEN (fig. 8). Os pluviômetros automáticos foram instalados em 2013, com o objetivo de ampliar a rede de monitoramento no município e auxiliar na gestão do risco local. Dessa forma, quando há o registro de chuvas, os pluviômetros se conectam aos servidores de rede e transmitem via WIFI os dados de intensidade da chuva em mm/h, sendo disponibilizado para a Sala de Situação e Monitoramento desenvolvida pelo CEMADEN. A leitura de chuva é feita em mm a cada 10 minutos com chuva e, caso não ocorra precipitação a PCD se conectará uma vez a cada hora.

Após a aplicação de buffers para os pluviômetros, com raios de 2 km, foi possível notar uma sobreposição em algumas áreas de coberturas, mais precisamente na porção leste do município. Todavia, em outras áreas de risco nota-se uma ausência dessa cobertura, como é o caso da Região GRJ10 e GRJ11. Neste caso seria interessante deslocar alguns pluviômetros de forma a se obter uma melhor operacionabilidade.

Distribuição dos escorregamentos Ocorridos em Guarujá entre 1998-2020

Os registros de atendimento da Defesa Civil municipal no período apontam um total de 1003 ocorrências (fig. 9 e 10). Destacam-se os anos de 2010 e 2020 que apresentaram número de escorregamentos acima dos demais anos, correspondendo a 101 e 153 ocorrências, respectivamente. No ano de 2010 registrou-se um total pluviométrico anual de 2846 mm, 26% acima da média anual, enquanto que em 2020 o acumulado anual foi de 2314 mm, ficando assim 2% acima da média.

De acordo com os registros da Defesa Civil municipal, somente nas encostas de Risco Alto foram deflagrados 730 escorregamentos (fig. 11), totalizando assim 74% de todo o registro histórico de escorregamentos do município.

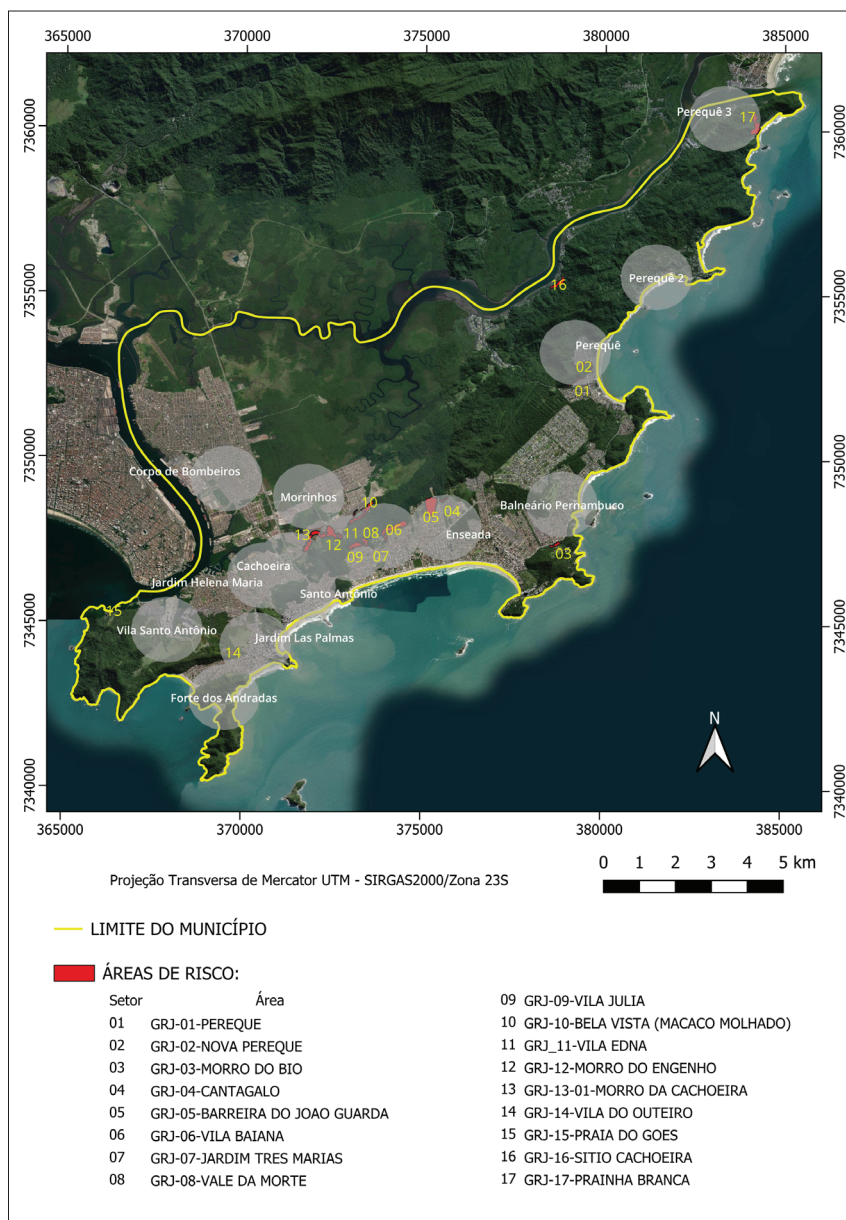


Fig. 8 - Distribuição dos pluviômetros automáticos no município de Guarujá com um raio considerado de 2 km.

Fig. 8 - Distribution of automatic rain gauges in the municipality of Guarujá with a radius considered to be 2 km

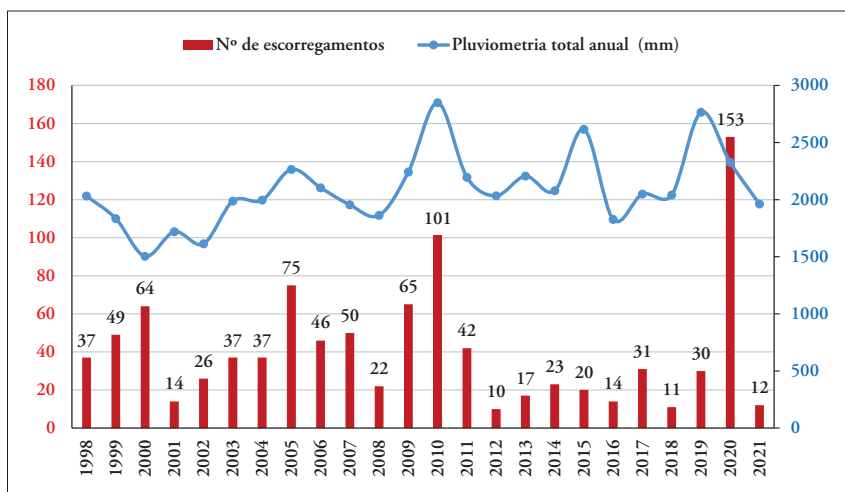


Fig. 9 - Ocorrências totais anuais de escorregamentos e pluviometria anual em mm no município de Guarujá entre 1998-2021 (Fonte dos dados: Defesa Civil do Guarujá, DAEE, 2024).

Fig. 9 - Total annual occurrences of landslides and annual rainfall in mm in the municipality of Guarujá between 1998-2021 (Data Source: Civil Defense of Guarujá, DAEE, 2024)..

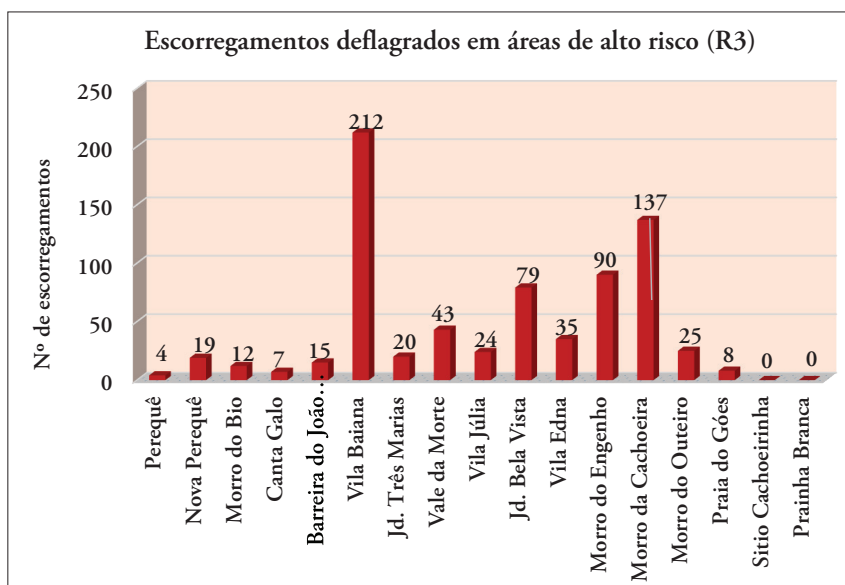


Fig. 10 - Ocorrências de deslizamentos em Guarujá entre 1998-2022 em áreas de Risco Alto (Fonte de dados: Defesa Civil do Guarujá).

Fig. 10 - Occurrences of landslides in high risk areas of Guarujá between 1998-2022 (Data Source: Civil Defense of Guarujá).

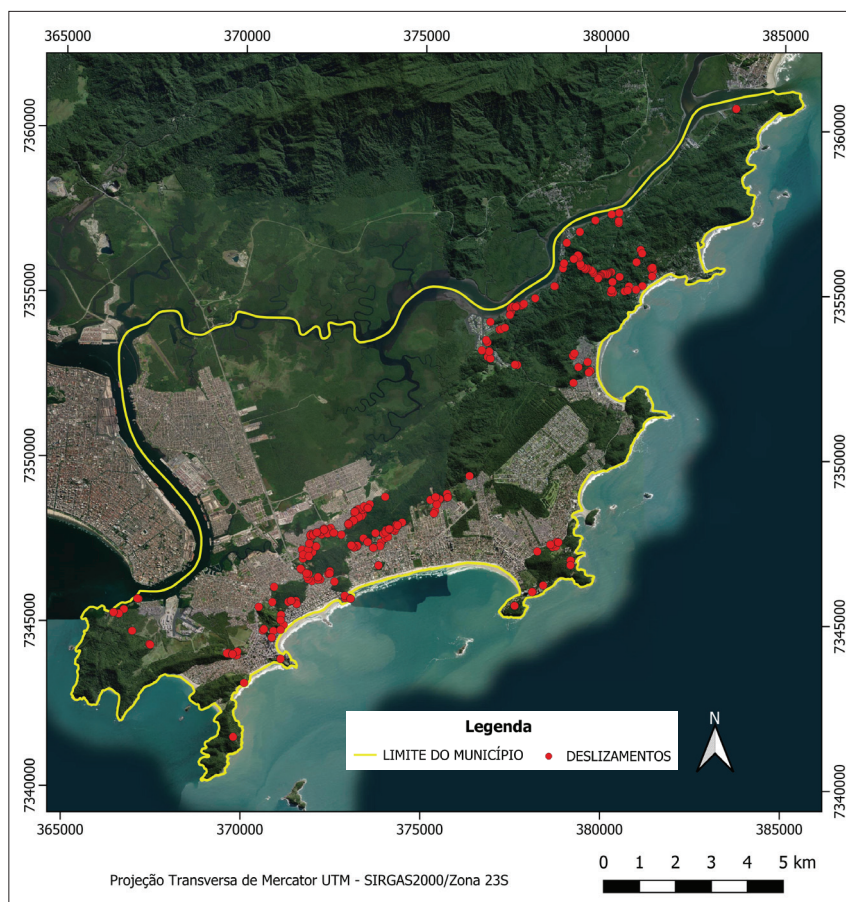


Fig. 11 - Localização das ocorrências de escorregamentos no município de Guarujá entre 1998-2021.

Fig. 11 - Location of occurrences of landslides in the municipality of Guarujá between 1998-2021.

Regionalização Municipal de Guarujá

Com base nos critérios fisiográficos, de distribuição espacial da pluviometria e da localização dos pluviômetros automáticos em relação às áreas de risco, foram individualizados cinco compartimentos regionais para o município de Guarujá (fig. 12).

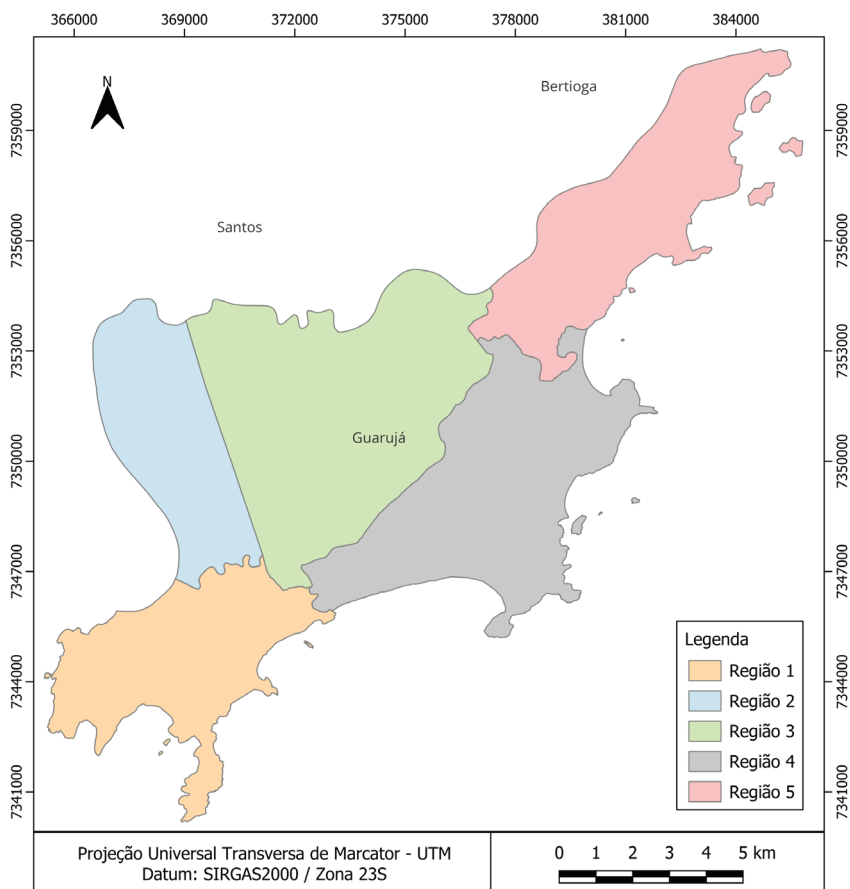


Fig. 12 - Proposta de regionalização para a cidade de Guarujá.

Fig. 12 - Regionalization proposal for the city of Guarujá.

A delimitação inicial foi realizada utilizando o critério geomorfológico, sendo posteriormente definindo os demais limites com base na distribuição das áreas de risco e da existência de pluviômetros próximos.

A Serra de Santo Amaro, feição alongada paralelamente à costa, funciona como uma barreira fisiográfica separando as chuvas provenientes do continente daquelas provenientes do oceano. Desta forma, o município foi inicialmente dividido em 2 regiões com distintos padrões pluviométricos. Este alto topográfico também oferece uma barreira de acesso às equipes de atendimento do PPDC. A partir

desta primeira divisão regional foram delimitadas as demais áreas em função dos demais critérios.

Em relação à distância dos pluviômetros instalados das áreas de risco, foi adotada a mesma concepção utilizada para correlações de escorregamentos com índices críticos de chuva, uma vez que serão esses índices que definirão os estados de alerta.

Na literatura, as recomendações de distâncias entre pluviômetros e as áreas de estudo são bastante diversas. A utilização de múltiplos pluviômetros juntamente com critérios topográficos foi apresentado por Brunetti *et al.* (2010) e Peruccacci *et al.* (2017). Quanto às distâncias Vennari *et al.* (2014), que trabalharam na região da Calábria (Itália) adotaram 12 km como limite de distância, enquanto Gariano *et al.* (2015) adotaram uma distância de 5 km. Já Vaz *et al.* (2018) consideraram como suficiente 10 km de distância. Para este trabalho, foi adotada a distância máxima de 5 km como o limite de influência entre o pluviômetro e a área de risco considerada.

A seguir são descritas as principais características de cada região.

Região 1

A Região 1 apresenta áreas com alta suscetibilidade a escorregamentos e inundações, com áreas de risco geológico e hidrológico, com baixa ocupação, motivo de apresentar poucas residências em risco alto para deslizamentos (12). Foram 33 ocorrências registradas no período a partir de 1998, com um óbito. Essa região conta com 5 pluviômetros instalados.

Região 2

A Região 2 Apresenta suscetibilidade apenas para alagamentos e inundações, contando com 2 pluviômetros instalados.

Sua principal importância consiste em concentrar todas as empresas retro portuárias, as quais oferecem ameaças ao município devido aos riscos tecnológicos. A Região 2 representa ainda a via de acesso para a Região 3 durante os episódios de emergência do Plano Preventivo.

Região 3

É considerada a segunda região com maior número de áreas de risco e registra 35% dos movimentos gravitacionais de massa ocorridos no município de Guarujá.

Grande parte dessa região possui encostas com declividades superiores a 60% sendo consideradas impróprias para ocupação.

Apresenta alta suscetibilidade à deslizamentos e alta taxa de ocupação destas áreas, com 822 moradias em risco alto. Nessa áreas também foram registras 341 escorregamentos desde 1998, com 10 óbitos.

Região 4

A Região 4 é a área de maior extensão e com maior número de áreas de risco e, conseqüentemente, apresenta o maior índice de escorregamentos registrados a partir de 1998. Foram 333 escorregamentos com 27 óbitos registrados.

Metade das áreas de risco estão situadas em depósitos de tálus na base das encostas ou em meia encosta,

Vale destacar a área designada Barreira do João Guarda onde um deslizamento de grande porte ocorrido em 2020 vitimou 23 pessoas.

Outro local de destaque é o Morro da Vila Baiana, onde ocorreram 64% das ocorrências de toda a Região 4, totalizando 212 escorregamentos, média de 9 movimentos gravitacionais de massa por ano.

Região 5

A Região 5 engloba toda a Serra do Guararu. Pelo fato de estar alinhada ao Oceano Atlântico, as chuvas frontais e convectivas incidem diretamente sobre a escarpa da Serra, gerando maiores índices de pluviosidade e intensificando os processos de instabilidade (Abreu *et al.*, 2022).

Apresenta alta suscetibilidade e escorregamentos e inundações, com 83 moradias localizadas em área de risco alto.

Apresentou 123 ocorrências registradas, com um óbito.

Conclusão

Neste trabalho é proposto um método de regionalização do município de Guarujá, com base nas características do meio físico, na distribuição de chuvas e nos registros pluviométricos.

Foi observado que a Defesa Civil atendeu 974 ocorrências de escorregamentos entre 1998 e 2020 e, cerca de 74% dos escorregamentos registrados se concentram nos períodos com maior incidência de chuva, entre os meses de dezembro a março, durante a operação do PPDC.

A regionalização permitiu hierarquizar as regiões mais vulneráveis em escala de prioridade durante episódios de chuvas fortes, devendo considerar as seguintes áreas obrigatoriamente nesta ordem: Região 4, Região 3, Região 5, Região 1 e Região 2. Vale ressaltar que, mediante a experiência dos profissionais locais, não é necessária uma chuva acima de 80 mm para que o município altere seu nível vigente para atenção, todavia uma chuva acima de 50 mm em 24 horas já aspira uma preocupação.

A técnica se mostrou bastante eficiente e de fácil aplicação, podendo ser replicada em outros municípios, sendo desejável que este possua uma rede de pluviômetros e um registro histórico de chuva, juntamente com um inventário dos processos.

A regionalização permite ainda maior autonomia de decisão pelo gestor, pois confere maior confiança e segurança referentes às informações necessárias para operação do PPDC, reduzindo o tempo de resposta na emissão de alertas, por exemplo.

No território regionalizado o gestor pode identificar a região que efetivamente se encontra em estado de atenção priorizando as intervenções nas áreas mais críticas e evitando a dispersão das ações, otimizando dessa forma a utilização de recursos humanos ou financeiros.

A utilização das ferramentas tecnológicas, como radares meteorológicos e rede observacional de pluviômetros automáticos permite um melhor controle e antecipação de eventos meteorológicos extremos causadores de danos e prejuízos, constituindo importante ferramenta aos gestores na tomada de decisão.

Por fim, esta pesquisa buscou contribuir para uma gestão mais eficaz na operação do PPDC, e nas ações de prevenção e resposta aos acidentes relacionados a escorregamentos, permitindo a construção de cidades mais resilientes.

Referências bibliográficas

- Abreu, J. V., Fernandez, C.A.S., Gamberini, M.V.B. (2022)., Escorregamento deflagrado na Barreira do João Guarda, Guarujá (SP): Desastre ocorrido no dia 02 de março de 2020 e situação pós evento, in *13º Simpósio Nacional de Geomorfologia*, 01 Ed., 2022, São José dos Campos, Anais... São José dos Campos: SINAGEO, 2022, 3778-3785.
- Almeida, F. F. M. de. (1964). Fundamentos geológicos do relevo paulista, *Boletim do Instituto de Geografia e Geologia*, São Paulo, n.º 41, 167-273.
- Brunetti, M. T., Peruccacci, S., Rossi, M., Luciani, S., Valigi, D., and Guzzetti, F., (2010). Rainfall thresholds for the possible occurrence of landslides in Italy, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 447–458.
- DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA DO ESTADO DE SÃO PAULO-DAEE. Banco de dados hidrológicos-BDH. Pluviômetro Perequê E3 - 043. URL: <http://ph.dace.sp.gov.br/Pluviometricos>. Acesso em 07/10/2024
- Gariano, S. L., Petrucci, O., and Guzzetti, F., (2015). Changes in the occurrence of rainfall-induced landslides in Calabria, southern Italy, in the 20th century, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 15, 2313–2330.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE (2019). Consulta à homepage oficial, http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/tabelas_pdf/Sao_paulo.pdf (Acessado Março 2019).
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO, IPT (1981). Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo, SP, escala 1:1 000.000. Vol. 1 e 2.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO, IPT (2016). Atualização do Plano Municipal de Redução de Risco de Deslizamento para o Município do Guarujá, São Paulo, Relatório Técnico n.º 148222 – 205.
- Perrotta, M., Salvador E. D., Lopes, R. C., D'Agostino, L. Z., Peruffo, N., Fomes, S. D., Sachs, L. L. B., Meira, V. T., Garcia, M. G. M., Lacerda Filho, J. V. (2005). Mapa geológico do Estado de São Paulo, 1:750.000. Programa Geologia do Brasil (PGB), CPRM, São Paulo.
- Peruccacci, S., Brunetti, M.T., Gariano, S. L., Melillo, M., Rossi, M., Guzzetti, F., (2017). Rainfall thresholds for possible landslide occurrence in Italy, *Geomorphology*, 290, 39–57.
- Varnes, D. J. (1978), Slope movement types and processes, in Schuster e Krizek (eds.), *Landslides, Analysis and Control: Transportation Research Board Special Report 176*, National Academy of Sciences, Washington DC, 11-33.
- Vaz, T., Zêzere, J. L., Pereira, S., Oliveira, S.C., Garcia, R.A.C., and Quaresma, I (2018). Regional rainfall thresholds for landslide occurrence using a centenary database, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 18, 1037–1054. DOI: <https://doi.org/10.5194/nhess-18-1037-2018>
- Vennari, C., Gariano, S. L., Antronico, L., Brunetti, M. T., Iovine, G., Peruccacci, S., Terranova, O., and Guzzetti, F. (2014). *Rainfall thresholds for shallow landslide occurrence in Calabria, southern Italy*. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 14, 317–330.

**MAPEAMENTO DE SUSCEPTIBILIDADE A
DESLIZAMENTOS NO ESTADO DO RIO DE JANEIRO
COM BASE EM ANÁLISE HIERÁRQUICA DE PROCESSOS
MAPPING OF SUSCEPTIBILITY TO LANDSLIDES
IN THE STATE OF RIO DE JANEIRO BASED ON
HIERARCHICAL PROCESS ANALYSIS**

Leandro de Souza Camargo¹

ORCID: 0000-0003-2464-8488

leoscamargof5@gmail.com

Rodrigo Werner da Silva²

ORCID: 0000-0003-1874-9856

werner.rodriigo@gmail.com

Marco Antonio Basques Sobrinho¹

ORCID: 0009-0001-3300-9904

cepedecrj@gmail.com

Marcos Paulo Dias da Silva¹

ORCID: 0009-0003-9040-5713

cepedecrj@gmail.com

Marcelo Luciano Vieira²

ORCID: 0000-0003-4319-715X

mlucianopuc@gmail.com

¹Centro de Estudos e Pesquisas em Defesa Civil (Brasil)
Secretaria de Estado de Defesa Civil do Rio de Janeiro

²Instituto Científico e Tecnológico de Defesa Civil (Brasil)
Secretaria de Estado de Defesa Civil do Rio de Janeiro

Resumo: Deslizamentos de terra representam uma ameaça em termos de prejuízos socioeconômicos e, conseqüentemente, perdas humanas, materiais e ambientais no Estado do Rio de Janeiro (ERJ). O objetivo da pesquisa consiste na identificação das áreas mais propensas à ocorrência de deslizamentos de terra no Estado do Rio de Janeiro (ERJ) utilizando análise multicritério espacial e Sistemas de Informações Geográficas (SIG). A metodologia envolveu a seleção de variáveis de predisposição a deslizamentos, reclassificação e ponderação via Análise Hierárquica

de Processamento (AHP), e construção de modelos de suscetibilidade. A validação com dados do CPRM (2015-2019) indicou alta acurácia (0,98 para fotointerpretação e 0,96 para levantamento de campo). O modelo anual identificou 22% do ERJ como de alta ou muito alta suscetibilidade, coincidindo com 44% dos eventos de deslizamento mapeados. A pesquisa demonstra a efetividade da metodologia para identificar áreas de risco e contribuir para a Redução do Risco de Desastres (RRD) no estado.

Palavras-chave: Desastres, gestão do risco de desastres, deslizamentos, sistemas de informações geográficas, AHP.

Abstract: Landslides represent a threat in terms of socioeconomic losses and, accordingly, human, material and environmental losses in the State of Rio de Janeiro (ERJ). The research set out to identify areas most prone to landslides in the State of Rio de Janeiro (ERJ) using spatial multicriteria analysis and geographic information systems (GISs). The methodology involved selecting landslide predisposition variables, reclassification, and weighting using the Analytic Hierarchy Process (AHP), and building susceptibility models. Validation with CPRM data (2015-2019) indicated high accuracy (0.98 for photointerpretation and 0.96 for field survey). The annual model identified 22% of ERJ as high or very high susceptibility, coinciding with 44% of mapped landslide events. The research demonstrates the effectiveness of the methodology in identifying risk areas and contributing to Disaster Risk Reduction (DRR) in the state.

Keywords: Disasters, disaster risk management, landslides, geographic information systems, AHP.

Introdução

Os processos de urbanização no Brasil, a partir do século XX, trouxeram profundas modificações nos volumes, direções e composição dos fluxos migratórios populacionais e os padrões de ocupação territorial (De Carvalho, 2019), e com a entrada do capital internacional, a partir do final da década de 1950, o Brasil intensificou a mudança de uma sociedade essencialmente agrícola, a produtor de industrializados (Baeninger, 2011), o que resultou na concentração de aglomerados urbanos detentores de uma infraestrutura habitacional incompatível com o novo padrão de ocupação do solo, onde impactou principalmente populações de maior vulnerabilidade social (Ferreira, 2009), que em sua maioria reside em encostas ou próximo a elas, propensas a deslizamentos (Rosa Filho, 2010).

Deslizamentos, também conhecidos como escorregamentos, são processos naturais que atuam na dinâmica das vertentes, deslocando materiais que recobrem as superfícies das encostas, tais como solos, rochas e vegetação, presentes nas regiões montanhosas e serranas em várias partes do mundo, segundo Tominaga *et al.* (2009), principalmente naquelas onde predominam climas quentes e úmidos frequentes nas regiões Sul, Sudeste e Nordeste do Brasil.

Embora façam parte da dinâmica superficial do planeta, no Brasil e no mundo, a ocorrência de deslizamentos em áreas urbanas tem potencial de produzir danos e prejuízos nas esferas econômicas, sociais, ambientais e em casos extremos, perdas de vidas humanas (Tominaga, 2007; Dourado *et al.*, 2012). Nesse sentido, Froude & Petley (2018) destacam que entre os anos de 2004 e 2018, deslizamentos foram responsáveis por mais de 4862 mortes no mundo. No Brasil, estima-se que 3.355 mortes, entre os anos de 1988 e 2013, foram provocadas pelos mesmos fenômenos (IPT, 2014). No Estado do Rio de Janeiro (ERJ), a dinâmica histórica da ocupação em encostas (Guerra *et al.*, 2007); sem o planejamento do uso e ocupação do solo favorecem a ocorrência de eventos associados a deslizamentos com potencial de atingir as dimensões de um desastre (Tominaga, 2007), como a catástrofe que alcançou a região serrana em janeiro de 2011 (Dourado *et al.*, 2012), o Morro do Bumba em abril de 2010 (Júnior & Dorigon, 2015) e o município de Petrópolis (Blaudt *et al.*, 2023).

Diante deste quadro, as ações de ordenamento territorial são necessárias para evitar ou mitigar eventos danosos com origem nos deslizamentos, contudo, a extensão territorial e as diferentes características regionais do ERJ dificultam a aplicação dos instrumentos de ordenamento urbano (Peres *et al.*, 2013), sendo necessária a prévia seleção de tais áreas. Com base nesta perspectiva, áreas passíveis de ocorrência de deslizamentos demandam técnicas de identificação e gerenciamento, para que possam mitigar as consequências danosas em possíveis ocorrências, contribuindo para a tomada de decisão e as ações de planejamento urbano que visam a previsão e prevenção de sua ocorrência por parte da sociedade e gestores do Estado.

Destaca-se neste processo a relevância do uso dos Sistemas de Informações Geográficas na identificação, avaliação e análise do fenômeno, com aplicações que podem subsidiar soluções práticas e de baixo custo (Camargo & Silva, 2017; Camargo *et al.*, 2019; Guerra *et al.*, 2019; de Souza Camargo *et al.*, 2022). Segundo o Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT, 1991), susceptibilidade a movimento de massas é definida como indicativo potencial da ocorrência de processos naturais e induzidos em uma área, dividida em classes de probabilidade a ocorrência de deslizamentos, gerados por chuvas intensas. A determinação das áreas suscetíveis a deslizamentos é preconizada pela seleção e hierarquização dos condicionantes que favorecem o fenômeno de estudo (Tominaga, 2009).

Estudos conduzidos por Fernandes *et al.* (2001), Clerici *et al.* (2002), Tominaga (2009), Faria (2011), Vanacôr & Rolim (2012), Stabile *et al.* (2013), Guerra *et al.* (2019) e Pozzobon *et al.* (2019) destacam que a previsão de deslizamentos é resultante da interação de fatores condicionantes combinados, dentre os quais citam-se: o uso e ocupação do solo, a pedologia, a litologia, a geomorfologia, a precipitação e a declividade, que, quando combinados, podem resultar na ruptura de taludes em encostas.

Diversos métodos podem ser utilizados para integrar os fatores de predisposição, tais como o método *Analytic Hierarchy Process* (AHP), amplamente utilizado na hierarquização de fatores de predisposição para deslizamentos devido a sua simplicidade, facilidade de utilização e grande flexibilidade (Panchal & Shrivastava, 2022; de Souza Camargo *et al.*, 2022). Uma das principais vantagens do AHP é a

possibilidade de medição da consistência interna dos julgamentos dos decisores, proporcionando uma compreensão compartilhada do problema. Além disso, o AHP permite a comparação das prioridades e importância relativa de cada fator, auxiliando na tomada de decisão. Entretanto, desvantagens como um limite prático de elementos de comparação recomendado, o estabelecimento de uma estrutura hierárquica com atributos independentes em cada nível (Saaty, 1996) e a impossibilidade de expressar incertezas ou lidar com alternativas incomparáveis (Vaidya & Kumar, 2006) são limitações combinadas destacam as dificuldades e restrições do AHP em diversos contextos de tomada de decisão.

Comparando os métodos de apoio à decisão multicritério com o *Analytic Hierarchy Process* (AHP), observa-se que cada abordagem possui suas próprias vantagens e desvantagens. O *Multiattribute Utility Theory* (MAUT) permite uma análise abrangente de fatores quantitativos e qualitativos, embora exija uma interação significativa entre os envolvidos na decisão (Vogdrup-Schmidt *et al.*, 2019). O *Analytic Network Process* (ANP) expande as capacidades do AHP para lidar com problemas não hierárquicos, embora a análise da influência dos elementos na rede possa ser complexa (Sipahi & Timor, 2010). O *Non-Traditional Capital Investment Criteria* (NCIC) destaca-se por sua capacidade de explicitar custos e benefícios não financeiros em valores monetários, mas não se concentra na determinação da superioridade de uma alternativa sobre outra (Chakraborty & Dey, 2007). O *Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique* (MACBETH), o *ELimination Et Choice Translation REality* (ELECTRE), o *Preference Ranking Organisation METHod for Enrichment Evaluations* (PROMETHEE) e o *Technique for Order Preference by Similarity to the Ideal Solution* (TOPSIS), oferece suas próprias abordagens e variantes para atender a diferentes necessidades de modelagem, embora possam exigir uma considerável interação entre os participantes do processo decisório e apresentar complexidades adicionais na determinação de pesos ou na escolha das alternativas ideais, variando de acordo com o contexto específico de aplicação.

Embora existam alguns trabalhos no âmbito municipal sobre a susceptibilidade a deslizamentos no ERJ como (Garcia *et al.*, 2016; Camargo & Silva, 2017; Meirelles *et al.*, 2018; Guerra *et al.*, 2019), nenhum deles ressalta a abordagem da construção de mapas de susceptibilidade a deslizamentos no regime anual e nos

meses de Janeiro, Fevereiro e Março (JFM) que concentram os maiores registros de desastres, o que evidencia a relevância desta pesquisa para o ERJ, bem como para as instituições de planejamento, resposta e controle locais. Nesta direção, a hipótese que o presente estudo se ancora, é a possibilidade de mapear as áreas suscetíveis a deslizamentos no Estado, para contribuir com os tomadores de decisão referentes às ações de Defesa Civil na gestão do risco de desastres no território ERJ.

Este trabalho avalia a susceptibilidade a deslizamentos no Estado do Rio de Janeiro (ERJ) através da aplicação do método AHP para considerar o regime de precipitação anual e mensal (JFM). A integração entre Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e análise de multicritério foi realizada para combinar e normalizar os principais fatores de predisposição que desencadeiam os processos de deslizamentos. Os fatores foram reclassificados em notas de 0 a 10, e foram construídos quatro mapas de susceptibilidade utilizando o método dos mínimos e máximos, os quais avaliam as áreas mais propensas a deslizamentos tanto no período anual quanto mensal, onde os intervalos de classes foram estabelecidos em 5 quintis. Por fim, os resultados foram validados por meio de análise de especificidade e sensibilidade demonstrada mediante a construção da Curva Característica de Operação do Receptor, ou, do inglês, *Receiver Operating Characteristic* (ROC) e da *Area Under the Curve* (AUC).

Diante do exposto, frente à preocupação das autoridades de gestão do risco de desastres no ERJ, considerando os elevados números de óbitos, vítimas dos deslizamentos ocorridos no território Fluminense, e outros prejuízos contabilizados, justifica-se o referido trabalho por permitir suporte em análises espaciais e tomadas de decisão diante da complexidade do tema, capaz de subsidiar e permitir a avaliação, a análise e a gestão destes fenômenos em escala local e regional, por parte dos órgãos de planejamento e controle como prefeituras, organismos de defesa civil e áreas de proteção ambiental.

Materiais e Método

Materiais

Base de Dados

Para composição deste estudo utilizou-se como base de dados: (a) Os dados de uso e cobertura do solo e geomorfologia procedentes do Instituto Estadual do Ambiente (INEA, 2018) na escala 1:250.000; (b) Os dados pedológicos oriundos da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Carvalho Filho *et al.*, 2000) na escala 1:500.000; (c) Os dados topográficos provenientes do satélite *Advanced Land Observing Satellite* (ALOS, 2006 a 2011) com resolução espacial de 12,5 m; (d) Os dados climatológicos procedentes do *WorldClim*, compreendidos entre 1977 – 2000, com resolução espacial de aproximadamente 1 km (Fick & Hijmans, 2017); (e) Os dados litológicos obtidos da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM, 2004) na escala de 1: 1.000.000 das cartas SF 23 e SF 24; (f) Cicatrizes de Deslizamentos obtidas das Cartas de Suscetibilidade a Movimentos Gravitacionais de Massa e Inundações entre 2015 – 2019 (CPRM, 2023). A TABELA I relaciona a fonte e a resolução espacial dos dados obtidos.

TABELA I - Relação entre a fonte de dados e a resolução espacial dos dados obtidos.

TABLE I - Relationship between the data source and the spatial resolution of the obtained data.

Dado Espacial	Formato	Escala/Resolução	Órgão
Uso e Cobertura do Solo	Vetorial	1:250.000	INEA
Geomorfológico	Vetorial	1:250.000	INEA
Pedológico	Vetorial	1:500.000	EMBRAPA
Litológico	Vetorial	1:1.000.000	CPRM
Precipitação	Matricial	1Km	WorldClim
Declividade	Matricial	12,5 m	ALOS

Ferramentas de Análise de Dados

Para a condução da análise dos dados, utilizaram-se os softwares: (a) Quantum GIS, na versão 3.10, para operações de geoprocessamento; (b) Microsoft Excel, versão 2010, empregado para manipulação e organização dos dados; (c) R Gui, versão 3.6.2, utilizado para análises estatísticas avançadas e elaboração de modelos.

Método

A metodologia adotada neste estudo aborda a seleção dos fatores de predisposição, descrevendo como os dados foram integrados e transformados em um formato compatível para serem manipulados em um ambiente de Sistemas de Informações Geográficas (SIG). Em seguida, os dados foram reclassificados em diferentes notas. Além disso, é apresentado o método de análise de multicritério *Analytic Hierarchy Process* (AHP) para combinar e ponderar os fatores de predisposição. Por meio desse processo, foram gerados quatro modelos que identificam a condição de ameaça por área, classificada em cinco níveis, com a separação de classes por quartis. Por fim, o modelo anual foi comparado com o inventário de deslizamentos e validado usando a curva ROC e a AUC a fim de avaliar a qualidade global do modelo proposto (fig.1).

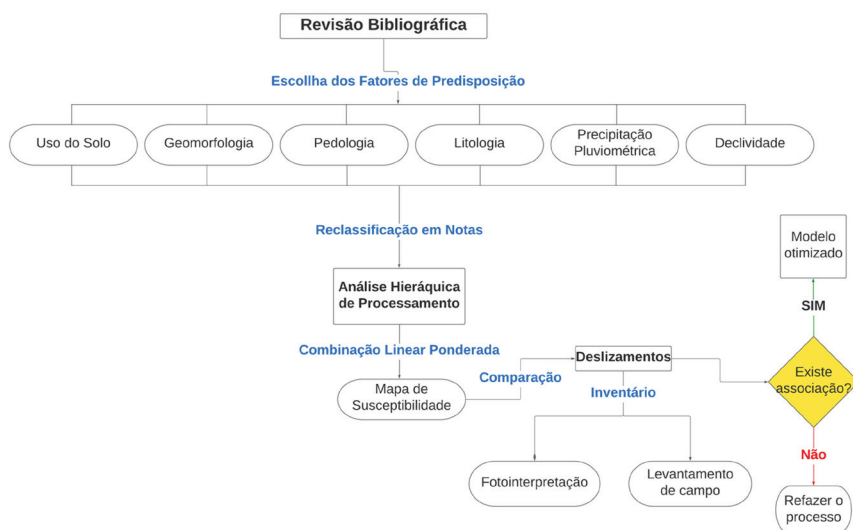


Fig. 1 - Método utilizado na elaboração do estudo.

Fig.1 - Method used in the preparation of the study.

Fatores de Predisposição

Na seleção dos fatores para a modelagem da suscetibilidade a deslizamentos, foram considerados critérios geológicos e ambientais. O uso do solo foi escolhido devido

à sua influência direta na estabilidade do terreno, refletindo padrões de ocupação e uso da terra que podem promover a ocorrência de deslizamentos (Tominga, 2009). A geomorfologia foi priorizada pela sua capacidade em fornecer informações sobre a morfologia do terreno e sua relação com processos de instabilidade, conforme destacado por Guerra *et al.* (2019). A pedologia foi incluída devido às suas características que afetam a infiltração, percolação e condutividade hidráulica do solo (Mendonça *et al.*, 2009), além da variação do potencial de deslizamentos em relação à espessura do solo (Ho *et al.*, 2012). As características litológicas e sua resistência aos processos erosivos foram consideradas relevantes na predisposição a deslizamentos, devido aos vazios entre os grãos minerais (Pinto *et al.*, 2015). A interação entre precipitação pluviométrica e declividade é reconhecida como um dos principais gatilhos para deslizamentos (Highland & Bobrowsky, 2008; Silva *et al.*, 2011; Dominguez-Cuesta, 2012; Dourado *et al.*, 2012; de Oliveira *et al.*, 2016; Wilde *et al.*, 2018; León 2020).

Pré processamento dos dados

O pré-processamento dos dados incluiu a integração e transformação para um formato compatível com os fatores de predisposição adotados, seguindo a metodologia delineada por Ferrari (2016). Os dados originais de Uso e Cobertura do Solo, Geomorfologia, Pedologia e litologia foram convertidos para o formato matricial para compatibilização com os dados de Precipitação e Declividade. Foi realizada uma reclassificação em notas de 1 a 10, considerando diferentes níveis de importância climatológica e geobiofisiográfica, utilizando o software QGIS 3.10, seguindo o método proposto por Guerra *et al.* (2019) para os dados de uso e cobertura do solo, geomorfologia, pedologia e litologia. Os dados de precipitação anual e entre os meses de JFM foram padronizados com uso do método de mínimo e máximos (Ferreira, 2016). A reclassificação do mapa de declividade seguiu a metodologia proposta pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA). Após a padronização dos formatos e a reclassificação dos fatores de predisposição, as coordenadas geográficas foram convertidas em métricas por

meio da projeção cônica equivalente de Albers (De Oliveira & Saraiva, 2015), permitindo a estimativa da área ocupada por cada classe de suscetibilidade no ERJ em quilômetros quadrados (de Souza Camargo *et al.*, 2022).

Analytical Hierarchical Process (AHP)

O método *Analytical Hierarchy Process* (AHP) é amplamente utilizado para determinar os pesos de diferentes critérios em um problema, sendo comprovadamente eficaz na identificação de áreas favoráveis a eventos adversos. Baseado em pesquisas anteriores, como os estudos de Camargo & Silva (2017), Camargo *et al.* (2019), Basu & Pal (2019) e de Souza Camargo *et al.* (2022), o AHP desmembra o problema em uma hierarquia de critérios e subcritérios, refletindo as preferências dos tomadores de decisão. O processo envolve a construção da hierarquia, definição de prioridades e avaliação de consistência, sendo os pesos determinados por comparações em pares usando uma escala numérica de 1 a 9, conforme estabelecido por Saaty (1990) e descrito na TABELA II.

TABELA II - Escala de julgamento de importância do Método AHP.

TABLE II - *Importance Judgment Scale of the AHP Method.*

Valores Numéricos	Termos Verbais	Descrição
1	Igual Importância	Duas alternativas contribuem igualmente para o objetivo
3	Moderadamente mais importante	Uma alternativa apresenta leve favorecimento em relação à outra
5	Fortemente mais importante	Uma alternativa apresenta forte favorecimento em relação a outra
7	Muito fortemente mais importante	Uma alternativa apresenta elevado favorecimento em relação à outra e sua dominância é demonstrada na prática
9	Extremamente mais importante	Uma alternativa é favorecida em relação à outra
2,4,6 e 8	Valores intermediários	Condição intermediária entre duas definições.

Fonte: Adaptado (Saaty, 1990). *Source: Adapted (Saaty, 1990).*

Após a construção da matriz de comparação pareada, os elementos são normalizados e a média aritmética das linhas é calculada para obter os pesos (W_i). A verificação da consistência dos pesos, conhecida como autovetor, é feita

comparando o autovalor máximo (λ_{max}) com o número de linhas (ou colunas) da matriz de comparação paritárias. Quanto mais próximo λ_{max} estiver de n, mais consistente será o resultado. O autovalor é calculado através da Equação 1, onde (w_i) corresponde aos pesos calculados e (Aw_i) é a matriz resultante do produto da Matriz de Comparação Pareada pelos pesos calculados.

$$\lambda = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{Aw_i}{w_i}$$

A Razão de Consistência (RC), proposta por Saaty (1990), avalia a integridade dos julgamentos realizados comparando o Índice de Consistência (IC) com o Índice de Consistência Aleatório (CA). O IC é calculado a partir do desvio do autovalor máximo (λ_{max}) em relação ao número de graus de liberdade da matriz de comparações paritárias (n - 1), calculado conforme a Equação 2.

$$IC = (\lambda_{max} - n)/(n - 1)$$

O Índice de Consistência Aleatória (CA) é o valor esperado em uma matriz de comparação paritária se os julgamentos fossem aleatórios. O CA Foi construído da análise de 500 matrizes de até 11 por 11, com os valores listados na TABELA III.

TABELA III - Índice de Consistência Aleatória em função da Matriz 11 por 11.

TABLE III - Random Consistency Index as a function of the 11 by 11 Matrix.

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
CA	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51

Fonte: Adaptado (Saaty, 1990). Source: (Saaty 1990).

Para calcular a Razão de Consistência (RC), o Índice de Consistência (IC) é dividido pelo Índice de Consistência Aleatório (CA). Com base nos valores numéricos fornecidos pelo método AHP para cada critério, determinou-se o peso de cada fator de predisposição, seguido pela combinação linear ponderada dos fatores conforme a Equação 3. Esse processo visa integrar os critérios em um modelo

$$CI = \sum_{i=1}^n D_i W_i$$

preditivo único para classificar regiões suscetíveis a eventos de deslizamentos no quadro anula e nos meses de JFM, onde CI representa a combinação linear, Di são os critérios e Wi são os pesos obtidos pelo método AHP.

Validação

O método de validação do modelo cartográfico para mapeamento da susceptibilidade a deslizamentos no ERJ compreendeu análises estatísticas comparativas entre os eventos históricos de deslizamentos e o mapa de susceptibilidade anual. Utilizando Curvas Características de Operação do Receptor (ROC) e medidas de acurácia (AUC), foram construídas curvas ROC distintas para cada método de obtenção de registros, como fotointerpretação e levantamento de campo. Os eventos de deslizamentos foram separados em dois grupos, resultando em duas curvas ROC e medidas de acurácia diferentes, e uma comparação estatística entre esses métodos foi realizada utilizando o p-valor. Os dados pontuais, obtidos entre os anos de 2015 e 2019, foram extraídos das Cartas de Suscetibilidade a Movimentos Gravitacionais de Massa e Inundações - Rio de Janeiro (CPRM, 2023).

Área de estudo

O ERJ (fig. 2) é uma das 27 unidades federativas do Brasil, localizado a sudeste da região Sudeste do país, tendo como limites os estados de Minas Gerais (norte e noroeste), Espírito Santo (nordeste) e São Paulo (sudoeste), além do Oceano Atlântico (leste e sul). Ocupa uma área de aproximadamente 43.780.173 km², compreendido entre os fusos UTM 23S e 24S de coordenadas geográficas 22° 54' S e 43° 10' W, com população estimada 16.054.524 pessoas e densidade demográfica média de 366,96 hab/m² (IBGE, 2022). Onze Regionais de Defesa Civil, distribuídas pelo ERJ entre 92 municípios atuam nas atividades de monitoramento e gestão de emergências e desastres naturais, tais como terremotos, inundações, incêndios florestais e tempestades severas, conforme diretrizes estabelecidas pela

Superintendência Operacional (SuOp) da Secretaria de Estado e Defesa Civil (SEDEC) do ERJ, realizando ações estratégicas para reduzir riscos de desastres, coordenando atividades de proteção e defesa civil regionalmente em colaboração com municípios (Silva *et al.*, 2021). No contexto das REDECs, são apresentados na TABELA IV a configuração dos municípios, a área territorial e o quantitativo populacional de cada região.

TABELA IV - Distribuição das Regionais de Defesa Civil (REDEC) por Área (km²), População e Municípios.

TABLE IV - *Distribution of Civil Defence Regional Centres (REDEC) by Area (km²), Population, and Municipalities.*

REDEC	Área (km ²)	População	Municípios
Capital	1200	6.211.223	Rio de Janeiro
Baixada Fluminense	1912	3.111.801	Belford Roxo, Duque de Caxias, Guapimirim, Magé, Mesquita, Nilópolis, Nova Iguaçu e São João de Meriti
Baixada Litorânea	5316	1.170.952	Araruama, Armação dos Búzios, Arraial do Cabo, Cabo Frio, Casimiro de Abreu, Iguaba Grande, Macaé, Rio Bonito, Rio das Ostras, São Pedro da Aldeia, Saquarema e Silva Jardim
Costa Verde	2015	253.526	Angra dos Reis, Mangaratiba, e Paraty
Metropolitana	2272	1.888.066	Cachoeiras de Macacu, Itaboraí, Maricá, Niterói, São Gonçalo e Tanguá
Noroeste	6929	344.841	Aperibé, Bom Jesus do Itabapoana, Cambuci, Cardoso Moreira, Italva, Itaocara, Itaperuna, Laje do Muriaé, Miracema, Natividade, Porciúncula, Santo Antônio de Pádua, São Fidélis, São José de Ubá e Varre-Sai
Norte	6966	622.516	Campos dos Goytacazes, Carapebus, Conceição de Macabu, Quissamã, São Francisco de Itabapoana e São João da Barra
Serrana I	3155	528.045	Areal, Carmo, Petrópolis, São José do Vale do Rio Preto, Sapucaia, Sumidouro e Teresópolis
Serrana II	4435	302.893	Bom Jardim, Cantagalo, Cordeiro, Duas Barras, Macuco, Nova Friburgo, Santa Maria Madalena, São Sebastião do Alto e Trajano de Moraes
Sul I	6705	1.012.665	Barra do Piraí, Barra Mansa, Comendador Levy Gasparian, Itaiaia, Paraíba do Sul, Paty do Alferes, Pinheiral, Porto Real, Quatis, Resende, Rio das Flores, Três Rios, Valença, Vassouras e Volta Redonda
Sul II	2756	576.821	Engenheiro Paulo de Frontin, Itaguaí, Japeri, Mendes, Miguel Pereira, Paracambi, Piraí, Queimados, Rio Claro e Seropédica

Fonte: Adaptado de SuOp (2024). *Source: Adapted from SuOp (2024).*

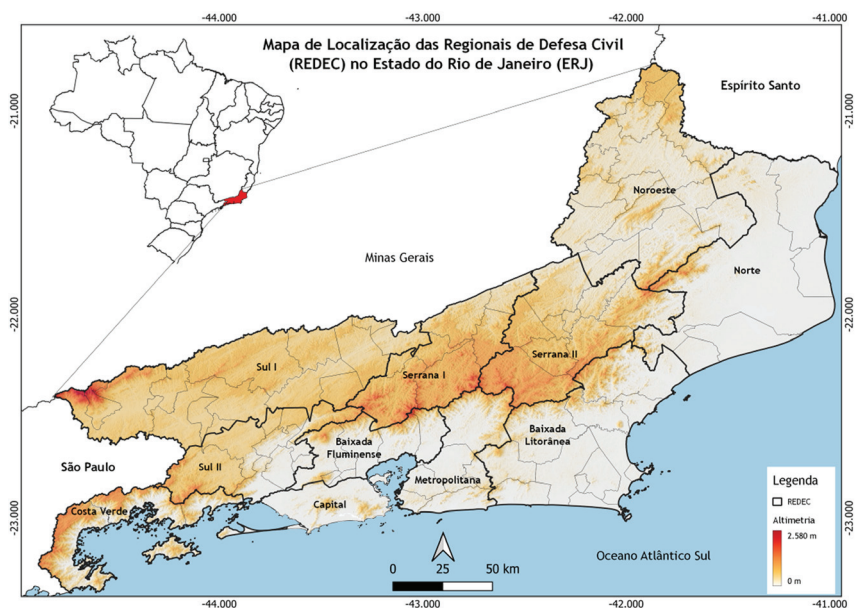


Fig. 2 - Mapa de Localização do Estado do Rio de Janeiro (ERJ)

(Fonte dos dados: IBGE, 2022).

Fig. 2 - Map of Rio de Janeiro State (ERJ) location (Data source: IBGE, 2020).

O ERJ exibe uma topografia diversificada, caracterizada por áreas montanhosas, planícies costeiras e vales encaixados, esculpidos por processos geológicos como a tectônica e a erosão. As serras e maciços, como a Serra do Mar e a Serra dos Órgãos, destacam-se por suas inclinações acentuadas e terrenos acidentados. Nas planícies costeiras, como nas regiões das REDECs Baixada Litorânea e Baixada Fluminense, prevalecem sedimentos recentes resultantes da interação entre o mar e os rios ao longo do tempo. Nas REDECs Serrana I, Serrana II, Sul I e Sul II, encontram-se formações rochosas antigas do Pré-Cambriano, como gnaisses, granitos, quartzitos, filitos e xistos, que compõem as imponentes cadeias montanhosas, como a Serra do Mar e a Serra da Mantiqueira. A topografia desempenha um papel crucial na distribuição das chuvas no ERJ, influenciando diretamente o padrão de precipitação. De acordo com Bastos & Napoleão (2010) e André *et al.* (2007), áreas de maior altitude tendem a receber níveis mais elevados de precipitação, enquanto regiões costeiras e de menor altitude registram índices pluviométricos menores. Além disso,

a dinâmica atmosférica, incluindo sistemas meteorológicos locais, de mesoescala e sinóticos, também exerce influência no regime de chuvas. A Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e as Frentes Frias (FF) destacam-se como os principais sistemas responsáveis pela precipitação, enquanto o Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) e o Vórtice Ciclônico de Altos Níveis (VCAN) podem ocasionar períodos de estiagem, dependendo de suas posições (Keller Filho *et al.*, 2005; Minuzzi *et al.*, 2007). Nesse contexto, chuvas intensas em regiões com topografia elevada historicamente têm provocado desastres relacionados a deslizamentos no ERJ, resultando em elevado número de mortos e impactando principalmente moradias com baixo padrão construtivo. Um exemplo notório é a tragédia na Serra das Araras (Jones, 1973), no município de Pirai, pertencente à REDEC Sul I, assim como nos municípios de Petrópolis, Teresópolis e Sumidouro, pertencentes à REDEC Serrana II e Nova Friburgo, pertencente a REDEC Serrana II (Dourado *et al.*, 2012). Tais eventos ocorreram entre os meses de janeiro e março, período de maior precipitação sazonal, com variações de acordo com a localidade dentro do estado.

Resultados

Os resultados são apresentados por meio de tabelas, gráficos e mapas, que ilustram tanto numericamente quanto espacialmente a distribuição das notas associadas aos fatores de predisposição, bem como sua relação com o inventário de deslizamentos. Além disso, é demonstrada a precisão da correlação entre os eventos de deslizamentos registrados por fotointerpretação e levantamento de campo, utilizando a curva ROC.

Uso e cobertura do solo

A classe Campos/Pastagens é a mais extensa, com 22.727 km² (53% da área total), seguida pela classe Floresta/Mangue/Comunidade relíquia, com 12.712 km² (30%). A classe Campos/Pastagens também apresenta a maior nota, enquanto a

classe Floresta/Mangue/Comunidade relíquia apresenta a menor. Em termos de eventos, a classe Campos/Pastagens concentra o maior número (3.256), o que corresponde a 62% do total. A classe Floresta/Mangue/Comunidade relíquia apresenta 1.700 eventos (32% do total) (fig. 3). Os resultados dessa análise descritiva estão resumidos na TABELA V.

TABELA V - Reclassificação do mapa de uso e cobertura do solo.
TABLE V - Reclassification of land use and land cover map.

Classes de Uso do Solo INEA	Notas	Área (km ²)	Área (%)	Eventos	Eventos (%)
Floresta/Mangue/Comunidade relíquia	1	12721	30%	1700	32%
Dinâmica Fluvial/Restinga/Área úmida	2	878	2%	2	0%
Reflorestamento/Agricultura	4	3408	8%	82	2%
Salinas/Cordão Arenoso/Afloramento Rochoso	6	826	2%	0	0%
Campos/Pastagens	8	22727	53%	3256	62%
Urbano	10	2470	6%	211	4%

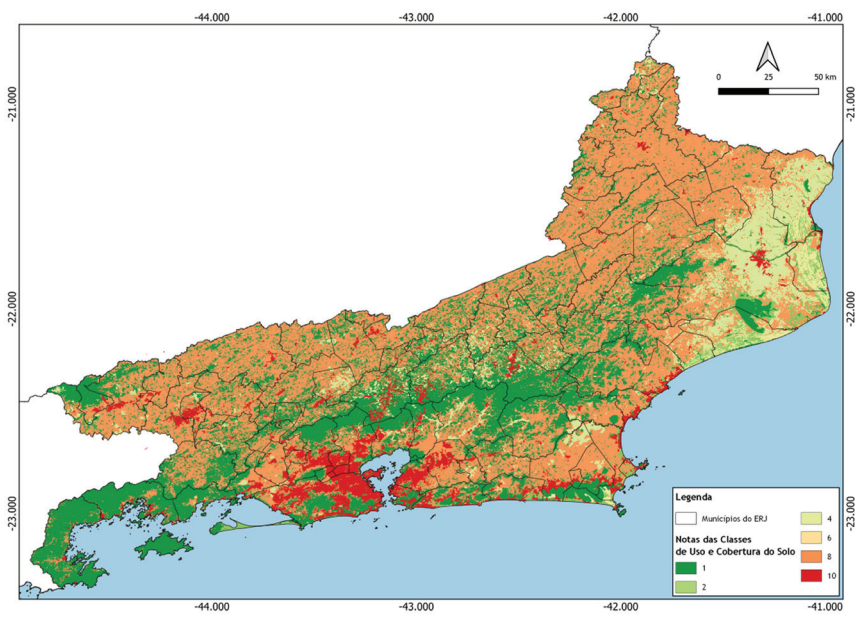


Fig. 3 - Mapa de uso e cobertura do solo reclassificado em diferentes notas
 (Fonte de dados: INEA.).

*Fig. 3 - Land use and land cover map reclassified into different categories
 (Data source: INEA).*

Geomorfologia

As planícies fluviais e flúvio-marinhas/cordões arenosos, dunas e restingas ocupam a maior área (13.816 km², 31% da área total), contudo, contribuem com uma baixa porcentagem de eventos (3%). Por outro lado, os morros, com uma área menor (7.703 km², 17% da área total), apresentam uma contribuição significativa em termos de eventos (31%). As serras isoladas e locais, totalizando 6.286 km² (14% da área total), e as serras escarpadas, abrangendo 8.481 km² (19% da área total), apresentaram uma proporção de eventos na ordem de 22% e 29%, respectivamente. As colinas, ocupam a menor área (826 km² ou 2% da área total), contribuíram com 15% dos eventos registrados. A fig. 4 mostra a reclassificação das classes geomorfológicas e a TABELA VI demonstra a análise descritiva dos resultados obtidos.

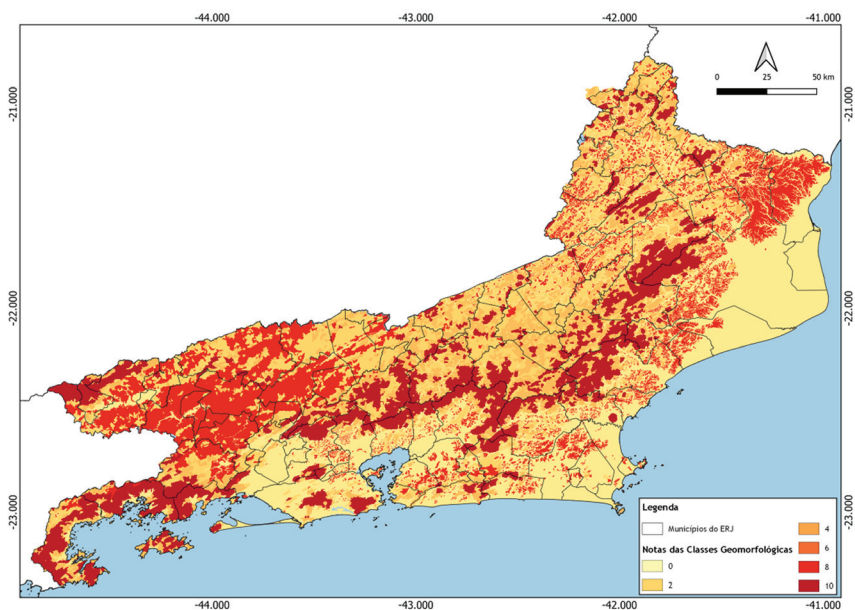


Fig. 4 - Mapa geomorfológico reclassificado em diferentes notas
(Fonte de dados: INEA).

*Fig. 4 - Geomorphological map reclassified into different grades
(Data source: INEA).*

TABELA VI - Reclassificação do mapa geomorfológico.

TABLE VI - *Reclassification of the geomorphological map.*

Classes geomorfológicas	Notas	Área (Km ²)	Área (%)	Eventos	Eventos (%)
Planícies fluviais e Flúvio-marinhas/cordões arenosos, dunas e restingas	1	13816	31%	175	3%
Morros	2	7703	17%	1646	31%
Serras Isoladas e Locais	3	6286	14%	1178	22%
Colinas	8	826	2%	830	15%
Serras Escarpadas	10	8481	19%	1545	29%

Pedologia

A análise das classes pedológicas revela que a Área de intervenção antrópica (aterro, terraplanagem, mineração, etc.)/Salina, com uma área de 93 km², 0% da proporção da área total, contribui com 38% dos eventos de deslizamentos registrados. Os Latossolos Vermelho-Amarelo álico/Água - Corpo de água/Ilha/Urbano/Latossolos Vermelho-Amarelo distróficos ocupam a maior área, totalizando 15.278 km² (35% da área total), porém, registraram 1 evento, correspondendo a 0% dos eventos observados. Os Cambissolos álico/Podzólicos Vermelho-Amarelo eutróficos/Podzólicos Vermelho-Amarelo distróficos/Podzólicos, com 24.635 km² (56% da área total), são responsáveis por 58% dos eventos. Os Gleis Pouco Húmicos eutróficos/Glei Pouco Húmico salino solódico/Glei Pouco Húmico álico/Afloramentos rochosos, cobrindo 2.898 km² (7% da área total), não registraram eventos. Os Solos Litólicos álicos/Brunizem Avermelhado, abrangendo 630 km² (1% da área total), contribuíram com 4% dos eventos. A fig. 5 representa as distintas classes pedológicas do ERJ e a TABELA VII resume os critérios adotados na reclassificação.

TABELA VII - Reclassificação do mapa pedológico.
TABLE VII - Reclassification of the pedological map.

Classes Pedológicas	Notas	Área (km ²)	Área (%)	Eventos	Eventos (%)
Área de intervenção antrópica (aterro, terraplanagem, mineração, etc.)/Salina	1	93	0%	1889	38%
Latossolo Vermelho-Amarelo álico/Água - Corpo de água/Ilha/Urbano/ Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico	2	15278	35%	1	0%
Solos Orgânicos distróficos	4	156	0%	0	0%
Cambissolo álico/Podzólico Vermelho-Amarelo eutrófico/Podzólico Vermelho-Amarelo distrófico/Podzólico	6	24635	56%	2888	58%
Glei Pouco Húmico eutrófico Glei Pouco Húmico salino solodico/ Glei Pouco Húmico álico/Afloramentos rochosos	8	2898	7%	0	0%
Solos Litólico álico/Brunizem Avermelhado	10	630	1%	182	4%

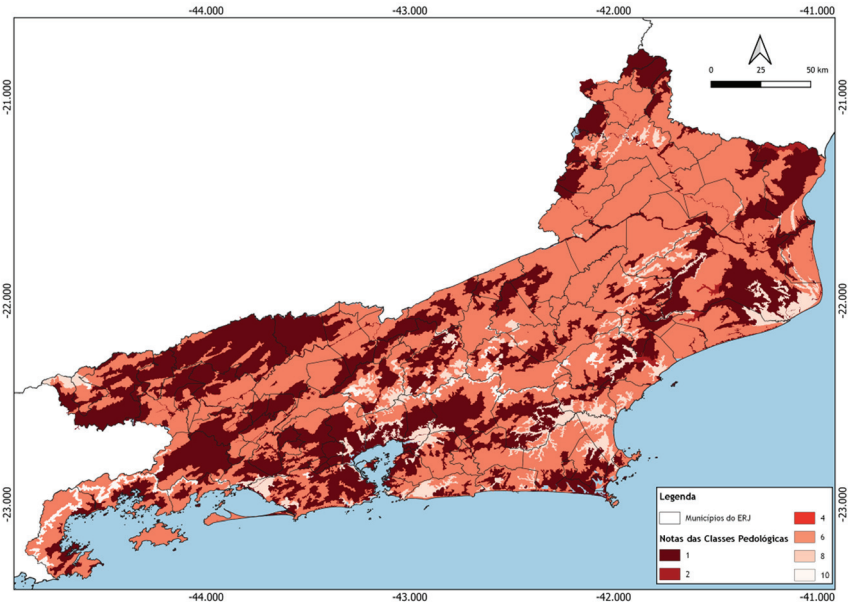


Fig. 5 - Mapa pedológico reclassificado em diferentes notas
(Fonte de dados: EMBRAPA).

Fig. 5 - Pedological map reclassified into different grades
(Data source: EMBRAPA).

Litologia

A classe composta por Biotita granito, Monzogranito, Charnockito, Enderbito, Granito, Granitóide, Granodiorito, Leucogranito, Metagranito, Metagranodiorito, Sienogranito, Monzogranito, Leucogranito, Tonalito (Nota 1), totalizando 17.660 km² (41% da área total), registrou a maior proporção de eventos, representando 56% do total observado. Em contrapartida, a classe composta por Albita anatexito, Biotita gabro, Charnockito, Diatexito, Enderbito, Fenito, Fóide sienito, Fonolito, Fonolito, Foyaíto, Foyaíto, Gnaiss, Gnaiss granítico, Granitóide, Kinzigito, Lamprófiro, Leucogranito, Litchfieldito, Migmatito estromático, Monzonito, Nefelina sienito, Nordmarkito, Norito, Ortognaiss, Ortognaiss tonalítico, Paragnaiss, Pseudoleucita fonolito, Pseudoleucita foyaíto, Pseudoleucita sienito, Pseudoleucita tinguaito, Pulaskito, Quartzito, monzonito Traquito (Nota 2), com 656 km² (2% da área total), apresentou uma proporção de eventos de 21%. As classes restantes, como Biotita gnaiss Brecha magmática, Fotolito, Foyaíto, Gabro, Gnaiss granulítico, Granito, Lamprófiro, Lherzolito, Metadiorito, Metagabro, Metatonalito, Ortognaiss Monzonito, Nefelina sienito, Nordmarkito, Norito, Ortognaiss Peridotito, Pulaskito, Quartzito diorito, Quartzito gabro, Traquito, Tufo alcalino (Nota 3), com 3.065 km² (7% da área total); Biotita gnaiss, Biotita granito, Brecha magmática, Fonolito, Foyaíto, Gnaiss, Kinzigito, Mica, xisto, Nefelina sienito, Paragnaiss, Quartzito, Rocha calcissilicática, Xisto (Nota 4), com 727 km² (2% da área total); e Biotita gnaiss, Brecha magmática, Fonolito, Foyaíto, Gnaiss, Kinzigito, Mica xisto, Nefelina sienito, Paragnaiss, Quartzito, Rocha calcissilicática, Xisto (Nota 5), com 12.830 km² (30% da área total), registraram proporções de eventos de 0%, 22%, e 1%, respectivamente. As classes compreendendo Areia, Arenito conglomerático, Argila, Argilito arenoso, Silte (Nota 8), com 281 km² (1% da área total), Areia, Arenito conglomerático, Argila, Argilito arenoso, Silte (Nota 9), com 6.975 km² (16% da área total), e Areia, Argila, Cascalho (Nota 10), com 703 km² (2% da área total), não registraram eventos. A TABELA VIII apresenta a hierarquização das notas e a fig. 6 representa as distintas classes litológicas do ERJ.

TABELA VIII - Reclassificação do mapa litológico.
TABLE VIII - Reclassification of the lithological map.

Classes Litológicas	Notas	Área (km ²)	Área (%)	Eventos	Eventos (%)
Biotita granito, Monzogranito, Charnockito, Enderbitio, Granito, Granitóide, Granodiorito, Leucogranito, Metagranito, Metagranodiorito, Sienogranito, Monzogranito, Leucogranito, Tonalito	1	17660	41%	3033	56%
Albita anatectio, Biotita gabro, Charnockito, Diactextio, Enderbitio, Fenito, Fôide sienito Fonolito, Fonolito, Foyaito, Foyaito, Gnaíse, Gnaíse granítico, Granitóide, Kinzigito, Lamprófito, Leucogranito, Litchfieldito, Migmatito estromático, Monzonito, Nefelina sienito, Nordmarkito, Norito, Ortognaíse, Ortognaíse tonalítico, Paragnaíse, Pseudoleucita fonolito,, Pseudoleucita foyaito, Pseudoleucita sienito, Pseudoleucita tinguató, Pulaskito, Quarzo, monzonito Traquito.	2	656	2%	1107	21%
Biotita gnaíse Brecha magnética, Forolito, Foyaito, Gabro, Gnaíse granulítico, Granito, Lamprófito, Lherzolito, Meradiorito, Metagabro Metatonalito, Ortognaíse Monzonito, Nefelina sienito Nordmarkito Norito, Ortognaíse Peridiorito, Pulaskito, Quarzo diorito Quarzo gabro, Traquito, Tufo alcalino,	3	3065	7%	9	0%
Biotita gnaíse, Biotita granito, Brecha magnética, Fonolito, Foyaito, Gnaíse, Kinzigito, Mica, xisto, Nefelina sienito, Paragnaíse, Quartzito, Rocha calcissilicática, Xisto	4	727	2%	1195	22%
Biotita gnaíse, Brecha magnética, Fonolito, Foyaito, Gnaíse, Kinzigito, Mica xisto, Nefelina sienito, Paragnaíse, Quartzito, Rocha calcissilicática, Xisto.	5	12830	30%	34	1%
Areia, Arenito conglomerático, Argila, Argilito arenoso, Silte	8	281	1%	1	0%
Areia, Arenito conglomerático, Argila, Argilito arenoso, Silte	9	6975	16%	0	0%
Areia, Argila, Cascalho	10	703	2%	0	0%

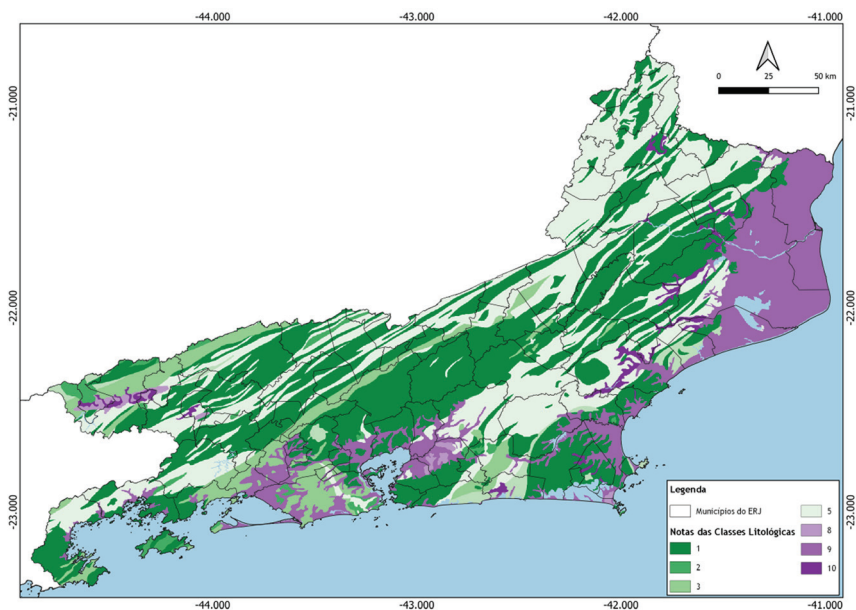


Fig. 6 - Mapa litológico reclassificado em diferentes notas
(Fonte de dados: CPRM).

*Fig. 6 - Lithological map reclassified into different grades
(Data source: CPRM).*

Precipitação pluviométrica

Para o intervalo de 812 mm a 1126,4 mm de precipitação normalizada (0 a 0,2 na escala normalizada) no quadro anual, a área abrangida é de 10.615,48 km² (25% da área total), registrando 386 eventos, o que equivale a 7% do total observado. No intervalo seguinte, de 1126,4 mm a 1440,8 mm (0,2 a 0,4 na escala normalizada), a área é maior, totalizando 19.985,9 km² (46% da área total), com 1.928 eventos registrados, representando 36% do total. Já para o intervalo de 1440,8 mm a 1755,2 mm (0,4 a 0,6 na escala normalizada), a área é de 10.965,12 km² (25% da área total), registrando 2.791 eventos, ou 52% do total. No entanto, à medida que a precipitação normalizada aumenta, as áreas cobertas e os eventos diminuem, sendo que para o intervalo de 1755,2 mm a 2069,6 mm (0,6 a 0,8 na escala normalizada), a área é de 1.286,846 km² (3% da área total), com 225 eventos registrados (4%

do total). Finalmente, para o intervalo de 2069,6 mm a 2384 mm (0,8 a 1,0 na escala normalizada), a área é de 321,5106 km² (1% da área total), com 27 eventos registrados, representando 1% do total. A TABELA IX resume os limiares adotados mediate a correspondencia com os valores normalizados e a fig. 7 ilustra a distribuição pluviométrica anual e as variações mensais no regime de chuvas no ERJ.

Para o intervalo de 56 mm a 123 mm de precipitação normalizada (0 a 0,2 na escala normalizada), observa-se uma área afetada de 2.340 km² em janeiro (5% da área total), aumentando para 16.091 km² em fevereiro (37%) e 12.708 km² em março (29%). No intervalo seguinte, de 123 mm a 190 mm (0,2 a 0,4 na escala normalizada), a área afetada totaliza 16.588 km² em janeiro (38%), 18.083 km² em fevereiro (42%), e 22.113 km² em março (51%). Já para o intervalo de 190 mm a 257 mm (0,4 a 0,6 na escala normalizada), a área afetada diminui, com 15.644 km² em janeiro (36%), 8.675 km² em fevereiro (20%), e 8.036 km² em março (19%). No entanto, à medida que a precipitação normalizada aumenta, a área afetada diminui. Para o intervalo de 257 mm a 324 mm (0,6 a 0,8 na escala normalizada), a área afetada é de 8.522 km² em janeiro (20%), 300 km² em fevereiro (1%), e 317 km² em março (1%). Por fim, para o intervalo de 324 mm a 391 mm (0,8 a 1,0 na escala normalizada), a área afetada é mínima, com 82 km² em janeiro (0%), 26 km² em fevereiro (0%), e nula em março.

TABELA IX - Reclassificação do mapa pluviométrico no regime anual.

TABLE IX - Reclassification of the annual rainfall map.

Anual						
Limiares de escorregamento	Normalizado	Notas	Área (km ²)	Área (%)	Eventos	Eventos (%)
812 mm – 1126,4mm	0 – 0,2	4	10615,48	25%	386	7%
1126,4 mm – 1440,8 mm	0,2 – 0,4	6	19985,9	46%	1928	36%
1440,8 mm– 1755,2 mm	0,4 – 0,6	8	10965,12	25%	2791	52%
1755,2 mm – 2069,6 mm	0,6 – 0,8	9	1286,846	3%	225	4%
2069,6 mm – 2384 mm	0,8 – 1,0	10	321,5106	1%	27	1%

TABELA X - Reclassificação dos mapas pluviométricos no regime mensal.

TABLE X - Reclassification of rainfall maps in the monthly regime.

Limiares de escorregamento	Normalizados	Notas	Janeiro		Fevereiro		Março	
			Área (km ²)	Área (%)	Área (km ²)	Área (%)	Área (km ²)	Área (%)
56 mm – 123 mm	0 – 0,2	4	2340	5%	16091	37%	12708	29%
123 mm – 190 mm	0,2 – 0,4	6	16588	38%	18083	42%	22113	51%
190 mm – 257 mm	0,4 – 0,6	8	15644	36%	8675	20%	8036	19%
257 mm – 324 mm	0,6 – 0,8	9	8522	20%	300	1%	317	1%
324 mm – 391 mm	0,8 – 1,0	10	82	0%	26	0%	0	0%

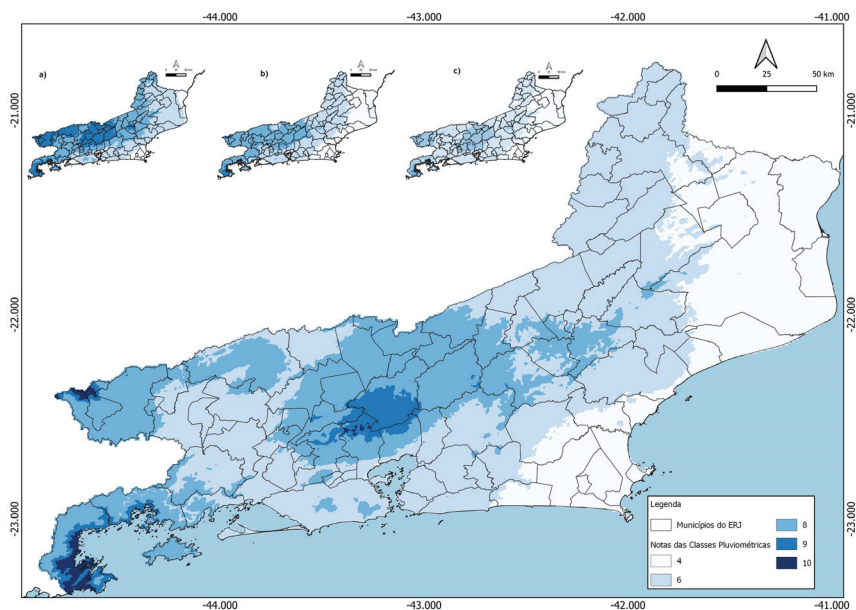


Fig. 7 – Mapa pluviométrico reclassificado em diferentes notas na categoria anual e segmentado em três períodos mensais distintos (Fonte dos dados: *WorldClim*: a) Precipitação Pluviométrica referente as mês de Janeiro, b) Precipitação Pluviométrica referente as mês de Fevereiro, c) Precipitação Pluviométrica referente as mês de Março).

Fig. 7 - Puviometric map reclassified into different grades within the annual category and segmented into three distinct monthly periods (Data Source: *WorldClim*): a) Pluviometric Precipitation for the month of January, b) Pluviometric Precipitation for the month of February, c) Pluviometric Precipitation for the month of March).

Declividade

Áreas de relevo plano (0% a 3%) abrangem 3.688 km² (8% da área total), com 4 eventos registrados, representando 0% do total. Relevo suavemente ondulado (3% a 8%) abrange uma área de 7.947 km² (18% da área total), registrando 32 eventos (1% do total). Já em áreas de relevo ondulado (8% a 20%), com 8.341 km² (19% da área total), são registrados 241 eventos (4% do total). À medida que a inclinação aumenta, a proporção de eventos também cresce. Relevo fortemente ondulado (20% a 45%) abrange 15.556 km² (36% da área total), com 2.056 eventos registrados, representando 38% do total. Áreas de relevo montanhoso (45% a 75%)

cobrem 6.983 km² (16% da área total), com 2.319 eventos registrados (43% do total). Por fim, em áreas de relevo fortemente montanhoso (acima de 75%), com 1.057 km² (2% da área total), são registrados 720 eventos (13% do total). A fig. 8 ilustra as distintas classes de declividade do ERJ, e a TABELA XI resume os critérios adotados na reclassificação.

TABELA XI - Reclassificação do mapa de declividade.
TABLE XI - Reclassification of the slope map.

Classes de declividade	Notas	Área (km ²)	Área (%)	Eventos	Eventos (%)
Relevo Plano (0% a 3%)	1	3688	8%	4	0%
Relevo Suavemente Ondulado (3% a 8%)	3	7947	18%	32	1%
Relevo Ondulado (8% a 20%)	5	8341	19%	241	4%
Relevo Fortemente Ondulado (20% a 45%)	8	15556	36%	2056	38%
Relevo Montanhoso (45% a 75%)	9	6983	16%	2319	43%
Relevo Fortemente Montanhoso (acima de 75%)	10	1057	2%	720	13%

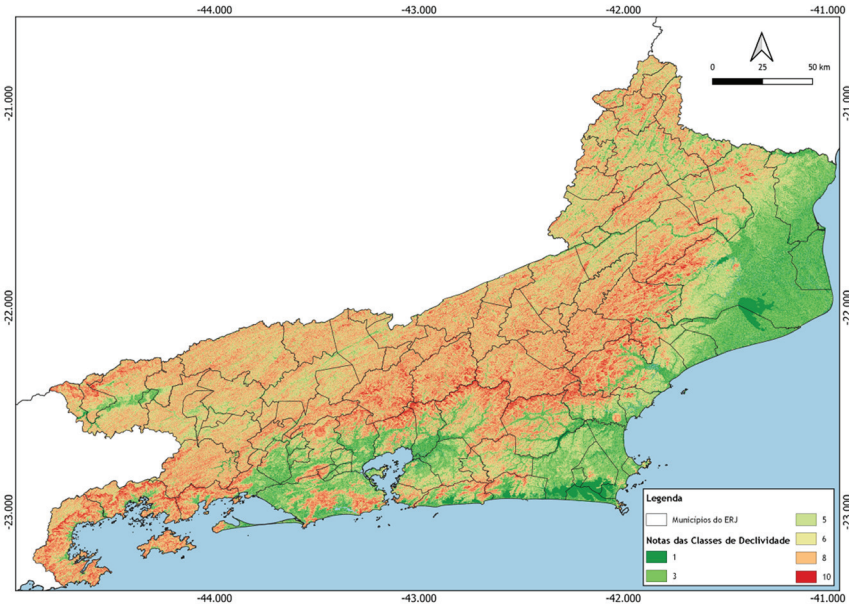


Fig. 8 - Mapa de declividade reclassificado em diferentes notas
 (Fonte de dados: ALOS).

*Fig. 8 - Slope map reclassified into different grades
 (Data source: ALOS).*

Analytical Hierarchical Process (AHP)

Após a comparação entre os fatores de predisposição, utilizando o AHP, os pesos estatísticos atribuídos a cada fator foram determinados conforme apresentado na TABELA XII. Os resultados indicam que o Autovalor obtido foi de 6,05, enquanto o Índice de Consistência foi de 0,01. Além disso, a Razão de Consistência foi calculada em 0,01.

TABELA XII - Grau de importância de cada condicionante.

TABLE XII - Degree of importance of each condition.

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	Peso
Uso do Solo	1,00	1,00	3,00	2,00	1,00	1,00	0,21
Geomorfologia	1,00	1,00	2,00	3,00	1,00	1,00	0,21
Pedologia	0,33	0,50	1,00	1,00	0,50	0,33	0,09
Litolologia	0,50	0,33	1,00	1,00	0,50	0,33	0,09
Precipitação	1,00	1,00	2,00	2,00	1,00	1,00	0,19
Declividade	1,00	1,00	3,00	3,00	1,00	1,00	0,22
Métricas de consistência do método AHP							
Autovalor		6,05					
Índice de consistência		0,01					
Razão de consistência		0,01					
Legenda							
C1		Uso do Solo					
C2		Geomorfologia					
C3		Pedologia					
C4		Litologia					
C5		Precipitação					
C6		Declividade					

Mapa de Susceptibilidade a Deslizamentos

Anualmente, 25% do território do ERJ, totalizando 10.592 km², foi classificado com susceptibilidade alta e muito alta a deslizamentos. Observou-se que a maior extensão territorial suscetível a deslizamentos foi classificada na categoria média, abrangendo 37% da área total do estado, seguida pelas áreas de baixa susceptibilidade, que compreenderam 28%. As categorias Muito Baixo e Muito Alto representaram as menores extensões territoriais, com 10% e 2% da área

total, respectivamente nesta ordem. Em termos de ocorrências de deslizamento, a classe de susceptibilidade média registrou a maior quantidade, representando 42% do total de eventos, enquanto a classe de Muito Baixo teve o menor número de eventos, com 1%. Os resultados são resumidos na TABELA XIII.

TABELA XIII - Susceptibilidade anual a movimentos de massa no ERJ.

TABLE XIII - Annual susceptibility to mass movements in the ERJ.

Classe	Intervalos	Notas	Área (km ²)	Área (%)	Eventos	Eventos (%)
Muito Baixo	0,0 – 0,2	1	4219	10%	61	1%
Baixo	0,2 – 0,4	2	11781	28%	733	14%
Médio	0,4 – 0,6	3	15840	37%	2228	42%
Alto	0,6 – 0,8	4	9532	22%	1870	35%
Muito Alto	0,8 – 1,0	5	1060	2%	463	9%

As REDECs Sul I e Costa Verde destacaram-se pelas maiores proporções de áreas suscetíveis a deslizamentos classificadas nas categorias alta e muito alta em relação à sua área total, representando 39% e 40%, respectivamente. A soma das áreas mencionadas corresponde a aproximadamente 3314 km², equivalente a 8% do território do ERJ e a 31% do total das áreas classificadas nessas categorias. Em contrapartida, as REDECs Norte e Baixada Litorânea registraram as maiores proporções de áreas classificadas com susceptibilidade baixa e muito baixa, totalizando 4956 km² e 3017 km², respectivamente. Deslizamentos predominaram nas REDECs Serrana I e Sul I, correspondendo a 1310 (24%) e 1143 (21%) do total de eventos, respectivamente nesta ordem, com predominância de registros na classificação média. O menor valor absoluto de registro de ocorrências deu-se na REDEC Costa Verde (198). A TABELA XIV resume a relação entre as áreas suscetíveis a deslizamentos e os registros de ocorrência por REDECs no ERJ.

TABELA XIV - Relação entre Áreas Suscetíveis a Deslizamentos e Registros de Ocorrências por REDECs no ERJ.

TABLE XIV: Relationship between Landslide-Prone Areas and Occurrence Records by REDECs in the ERJ.

Classe	Intervalos	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI
Muito Baixo	0,0 – 0,2	110	729	74	35	164	123	2304	10	40	54	76
Baixo	0,2 – 0,4	810	2288	592	310	863	1586	2652	651	1009	901	889
Médio	0,4 – 0,6	546	1637	350	773	849	3877	1503	1549	2503	3089	1158
Alto	0,6 – 0,8	387	494	76	724	343	1259	362	864	833	2563	593
Muito Alto	0,8 – 1,0	5	7	2	16	2	19	5	65	42	11	16
Número absoluto de eventos por REDEC e distribuídos por classificação de susceptibilidade a deslizamentos												
Classe	Intervalos	E-I	E-II	E-III	E-IV	E-V	E-VI	E-VII	E-VIII	E-IX	E-X	E-XI
Muito Baixo	0,0 – 0,2	6	7	-	0	2	0	2	4	24	5	11
Baixo	0,2 – 0,4	26	40	-	6	19	28	75	75	219	133	112
Médio	0,4 – 0,6	62	91	-	61	85	148	176	509	413	536	147
Alto	0,6 – 0,8	178	98	-	74	72	54	212	533	128	436	85
Muito Alto	0,8 – 1,0	77	19	-	57	25	19	19	189	18	33	7
Total de Eventos		349	255	-	198	203	249	484	1310	802	1143	362
Legenda												
I	Área em km ² da REDEC Baixada Fluminense em relação ao quadro anual											
II	Área em km ² da REDEC Baixada Litorânea em relação ao quadro anual											
III	Área em km ² da REDEC Capital em relação ao quadro anual											
IV	Área em km ² da REDEC Costa Verde em relação ao quadro anual											
V	Área em km ² da REDEC Metropolitana em relação ao quadro anual											
VI	Área em km ² da REDEC Noroeste em relação ao quadro anual											
VII	Área em km ² da REDEC Norte em relação ao quadro anual											
VIII	Área em km ² da REDEC Serrana I em relação ao quadro anual											
IX	Área em km ² da REDEC Serrana II em relação ao quadro anual											
X	Área em km ² da REDEC Sul I em relação ao quadro anual											
XI	Área em km ² da REDEC Sul II em relação ao quadro anual											

A relação entre os meses de janeiro, fevereiro e março, observa-se variações nas classes de susceptibilidade. Em janeiro, as áreas classificadas com Alta susceptibilidade abrangeram 35% da área total, enquanto as áreas de Muito Alto contribuíram com 8%. Em contraste, nos meses de fevereiro e março, as áreas de Alta susceptibilidade diminuiram 33,81% e 34,20%, respectivamente nessa ordem, ambas representando 23% da área total em cada mês, como demonstrado na TABELA XV.

TABELA XV - Susceptibilidade mensal a deslizamentos no ERJ.
 TABLE XV- Monthly susceptibility to mass movements in the ERJ.

Classe	Intervalos	Notas	Janeiro		Fevereiro		Março	
			Área (km ²)	Área (%)	Área (km ²)	Área (%)	Área (km ²)	Área (%)
Muito Baixo	0,0 – 0,2	1	635	1%	3417	8%	3373	8%
Baixo	0,2 – 0,4	2	7672	18%	11842	28%	11995	28%
Médio	0,4 – 0,6	3	16067	38%	16018	38%	16020	38%
Alto	0,6 – 0,8	4	14788	35%	9788	23%	9730	23%
Muito Alto	0,8 – 1,0	5	3260	8%	1357	3%	1306	3%

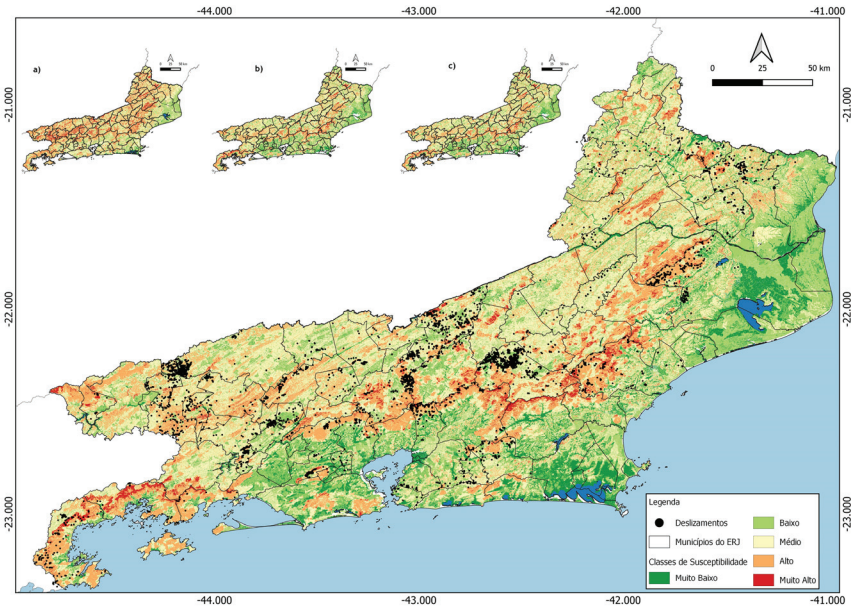


Fig. 9 - Mapa de Susceptibilidade a Deslizamentos no ERJ na categoria anual e segmentado em três períodos mensais distintos: a) Susceptibilidade em Janeiro, b) Susceptibilidade em Fevereiro, c) Susceptibilidade em Março).

Fig. 9 - Landslide Susceptibility Map in the ERJ for the annual category, segmented into three distinct monthly periods: a) Susceptibility in January, b) Susceptibility in February, c) Susceptibility in March).

Validação dos resultados obitidos

A curva ROC foi utilizada para validar 4974 pontos de deslizamentos obtidos por fotointerpretação e 368 pontos de deslizamentos por levantamento de campo. A acurácia da fotointerpretação foi de 0.98, enquanto a do levantamento de campo foi de 0.96. O valor-p foi inferior a 0,05, indicando que a diferença entre as duas técnicas é estatisticamente significativa. A fig. 10 apresenta a curva ROC para a validação dos eventos de deslizamentos.

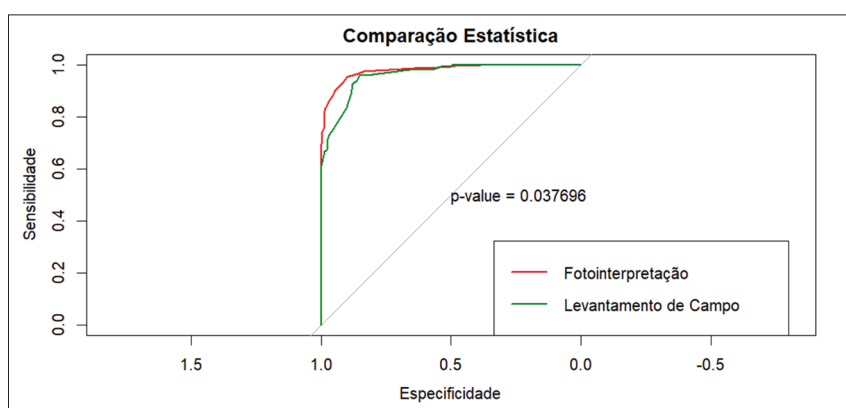


Fig. 10 - Curva ROC para validação de eventos de deslizamentos.

Fig. 10 - ROC Curve for landslide event validation.

Discussão

Guerra *et al.* (2019) corroboram a alta suscetibilidade a deslizamentos em áreas com cobertura vegetal escassa e alta densidade populacional com baixos padrões construtivos no Brasil e, em particular, no ERJ. Solos urbanos, com suas condições edáficas e bióticas modificadas pela expansão territorial, apresentam o maior risco. A ponderação da classe "uso do solo" (0,21) no modelo e a forte associação entre áreas de alto risco e a classificação utilizada comprovam essa relação. A expansão urbana desenfreada, sem planejamento adequado e com ocupação irregular de áreas de risco, aumenta consideravelmente a vulnerabilidade a deslizamentos (Tominaga, 2009; Faria, 2011).

Regiões com colinas e serras escarpadas, frequentemente ocupadas irregularmente por populações de baixa renda, receberam a terceira maior ponderação (0,21) no modelo de susceptibilidade a deslizamentos. As serras escarpadas, com topografia abrupta e íngreme, são mais suscetíveis a processos erosivos e movimentos de massa, como deslizamentos de terra e quedas de rocha, o que se reflete nos 29% de eventos registrados nessa classe. Já os morros, com inclinação moderada a acentuada, também apresentam alto risco de deslizamentos e concentram 31% dos eventos. Essa vulnerabilidade se intensifica pela ocupação irregular dessas áreas por populações de baixa renda, que muitas vezes não possuem acesso a moradias seguras e infraestrutura adequada no Brasil e, em particular, no ERJ (Rosa Filho, 2010; Garcia *et al.*, 2016).

Declives acentuadas, solos de baixa espessura, como argissolos e latossolos, e rochas menos resistentes, como arenitos e argilitos, são fatores que amplificam o potencial de deslizamentos em um terreno, como destacado por Schramm (2019). No modelo de susceptibilidade a deslizamentos, a declividade foi o fator com maior peso (0,22), e 43% dos eventos de deslizamentos ocorreram em áreas com a segunda maior nota atribuída a essa classe. Nas classes de pedologia e litologia, que receberam as menores ponderações no modelo, 58% e 56% dos eventos, respectivamente nesta ordem, concentraram-se nas notas mais altas e baixas, o que indica que os deslizamentos concentraram-se nos solos mais rasos e nas rochas que possuem baixa porosidade e menor capacidade de alterações químicas e físicas, em comparação com outras formações rochosas. As combinações destes fatores agravam a possibilidade de deslizamentos, contudo, o principal agente deflagrador são eventos extremos de precipitação em ambientes tropicais como destacam Seluchi *et al.*, (2011); Vieira & Gramani, (2015), principalmente na região sudeste do Brasil (Barcellos & De Quadro, 2019; Coelho & Nunes, 2020), associados à presença de ZCAS (Coelho & Nunes, 2020), Sistemas Frontais (Seluchi & Chou, 2009; (Dereczynski *et al.*, 2009; Seluchi *et al.*, 2016), Sistemas Convectivos Isolados (Silva *et al.*, 2019), ou mesmo a associação destes (Moura *et al.*, 2013). Neste sentido, quanto mais intenso o episódio de precipitação, maior a probabilidade de ocorrerem eventos de deslizamentos em áreas predispostas (Dourado *et al.*, 2012; Do Amaral *et al.*, 2020), fato este convergente com a

ponderação estabelecida (0,19) e a concentração dos registros de deslizamentos na reclassificação de peso 8, equivalente a 58% dos registros.

No período anual, as áreas classificadas com susceptibilidade muito baixa e baixa à ocorrência de escorregamentos distribuem-se ao longo de todo o ERJ, concentrando-se nas REDECS Norte e Baixada Litorânea. Essas áreas correspondem, em alguns locais, às planícies de inundação e reúnem condicionantes naturais pouco propícios à ocorrência de escorregamentos, como declividades compreendidas entre 0% - 5% (Relevo plano), impossibilitando o fluxo rápido de massas de solo ou rocha pelo efeito da gravidade (Highland & Bobrowsky, 2008; Dominguez-Cuesta, 2012; Wilde *et al.*, 2018; Guerra *et al.*, 2019). A geomorfologia é composta predominantemente por planícies fluviais, flúvio-marinhas, cordões arenosos, dunas e restingas, e solos de alta espessura e capacidade de infiltração, percolação e condutividade hidráulica (Mendonça *et al.*, 2009; Ho *et al.*, 2012), sendo estas classes responsáveis por ocuparem aproximadamente 35% do ERJ. Destaca-se que essas áreas não apresentam condições características que sugiram deslizamentos, contudo, devido a uma escala cartográfica de pequeno detalhe e outros condicionantes que não foram elencados nesta pesquisa, a ocorrência desses processos não pode ser desconsiderada, pois mesmo em locais onde os fatores de ordem natural não são favoráveis aos escorregamentos, a intervenção do homem pode desencadear tais processos.

O mapa de susceptibilidade a deslizamentos no período anual apresenta convergência com os registros de eventos, tanto para os dados pontuais de fotointerpretação (AUC de 0,98) quanto para levantamento de campo (AUC de 0,96). Apesar da limitação de escala do mapa, a convergência com os registros de campo confirma a confiabilidade do modelo na identificação de áreas suscetíveis. O valor de *p* inferior a 0,05 indica que a diferença na acurácia entre as duas técnicas é estatisticamente significativa, conferindo à fotointerpretação uma precisão superior. Isso se deve em grande parte ao fato de que a fotointerpretação, utilizando técnicas de sensoriamento remoto, abrange uma área mais ampla do território fluminense. Por outro lado, o levantamento de campo, limitado por questões como a necessidade de uma equipe técnica se deslocar até o local e o

acesso a áreas de difícil alcance, apresenta uma caracterização mais detalhada e fidedigna dos deslizamentos, uma vez que é conduzido por técnicos especializados diretamente no campo. Neste sentido, a eficiência do método AHP na ponderação dos fatores de predisposição é evidenciada pela convergência do modelo com os registros de deslizamento. Destaca-se que a simplicidade do método facilita sua replicação por diferentes agências respondedoras de desastres em âmbitos federal, estadual e municipal, de acordo com a disponibilidade de dados, possibilitando o aprimoramento contínuo do modelo e uma gestão do risco mais eficaz de áreas suscetíveis a deslizamentos.

Segundo os dados compilados na TABELA XV, a Região de Defesa Civil Sul I abrange 2574 km² de território altamente suscetível a deslizamentos, apresentando o segundo maior registro absoluto de ocorrências desse tipo. Essa identificação das áreas de maior risco de desastres está em consonância com o registro histórico do maior desastre de deslizamentos registrado no Brasil (Jones, 1973), corroborando com o aumento da extensão de áreas classificadas com susceptibilidade a deslizamentos alta e muito alta nos meses de janeiro e fevereiro, conforme indicado pelo modelo cartográfico proposto, convergente com a época do verão no ERJ. De acordo com Dereczynski *et al.* (2017), o verão e outono concentram 40% dos eventos que provocaram grandes danos à população, incluindo mortos, feridos, prejuízos, desabamentos, inundações, alagamentos, deslizamentos, entre outros.

No que diz respeito à correlação entre o mapa de susceptibilidade a deslizamentos no período anual e os registros de ocorrências, constatou-se uma predominância de deslizamentos nas categorias de susceptibilidade média (45%) e alta (35%), evidenciando a eficácia do mapa em identificar áreas de maior risco. Além disso, a análise das REDECs revelou que as regiões com maior incidência de deslizamentos, como Serrana I e Sul I, corresponderam de maneira consistente às categorias de susceptibilidade média e alta. Essa concentração de eventos de deslizamentos ao longo do tempo sugere que o mapa de susceptibilidade é uma ferramenta eficaz para delimitar áreas com alto potencial de ocorrência de deslizamentos, em conformidade com os padrões históricos observados.

Conclusão

Conclui-se a efetividade do mapeamento de susceptibilidade a deslizamentos como ferramenta de apoio a gestão do risco de desastres naturais no Estado do Rio de Janeiro. Através da análise multicritério, foi possível identificar áreas com diferentes níveis de susceptibilidade a deslizamentos, fornecendo subsídios para a tomada de decisões estratégicas na alocação de recursos e na implementação de medidas de prevenção e mitigação de desastres.

A análise espacial, utilizando técnicas de geoprocessamento e modelagem estatística, permitiu a identificação de áreas com maior risco de ocorrência de deslizamentos, corroborando com os eventos históricos documentados. A validação do modelo com dados independentes reforça a confiabilidade dos resultados obtidos e a aplicabilidade da metodologia proposta.

No entanto, é importante ressaltar que este estudo não esgota todas as possibilidades de mapeamento de áreas susceptíveis a deslizamentos no Estado do Rio de Janeiro (ERJ) devido às limitações encontradas. Portanto, há a necessidade de futuras pesquisas científicas para continuar fortalecendo a gestão do risco de desastres por deslizamento na região.

Bibliografia

- Baeninger, R. (2011). *Migrações internas no Brasil século 21: evidências empíricas e desafios conceituais. Mobilidade espacial da população: desafios teóricos e metodológicos para o seu estudo*. Campinas: Núcleo de Estudos de População–Nepo/Unicamp. URL: <https://www.nepo.unicamp.br/publicacoes/livros/mobilidade/cap4.pdf>
- Barcellos, D. R., & de Quadro, M. F. L. (2019). Classificação de eventos extremos de precipitação quanto sua intensidade, persistência e abrangência na região das ZCAS. *Metodologias e Aprendizado*, 2, 76-81. DOI: <https://doi.org/10.21166/metapre.v2i0.1320>
- Basu, T., & Pal, S. (2019). A GIS-based factor clustering and landslide susceptibility analysis using AHP for Gish River Basin, India. *Environment, Development and Sustainability*, 1-33. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10668-019-00406-4>
- Blaudt, L. M., Alvarenga, T. W., & Garin, Y. (2023). Desastre ocorrido em Petrópolis no verão de 2022: Aspectos gerais e dados da Defesa Civil. *Geosciences Geociências*, 42(01), 59-71. DOI: <https://doi.org/10.5016/geociencias.v42i01.17210>
- Camargo, L. D. S., da Silva, R. W., do Amaral, S. S., da Silva, A. P., Ferreli, T., & da Silva, M. P. D. (2019). Mapeamento de Áreas Susceptíveis a Incêndios Florestais do Município de Petrópolis–RJ. *Anuário do Instituto de Geociências*, 42(1), 630-641. DOI: https://doi.org/10.11137/2019_1_630_641

- Camargo, L. S., & Silva, S. M. L. (2017). Integração de técnicas de Sensoriamento Remoto e AHP no mapeamento de áreas susceptíveis a escorregamentos no município de Angra dos Reis - RJ. Em *Anais do 18º Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, São José dos Campos: INPE, 8014-8021.
- Carvalho Filho, A. D., Lumberreras, J. F., & Dos Santos, R. D. (2000). *Os solos do Estado do Rio de Janeiro*. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA). Disponível em: https://rigeo.cprm.gov.br/jspui/bitstream/doc/17229/9/rel_proj_rj_solos.pdf
- Chakraborty, S., & Dey, S. (2007). QFD-based expert system for non-traditional machining processes selection. *Expert Systems with Applications*, 32(4), 1208-1217.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2006.02.010>
- Clerici, A., Perego, S., Tellini, C., & Vescovi, P. (2002). A procedure for landslide susceptibility zonation by the conditional analysis method. *Geomorphology*, 48(4), 349- 364.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(02\)00079-X](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00079-X)
- Coelho, L. A. F., & Nunes, A. B. (2020). Eventos Recentes de Chuva Intensa na Cidade do Rio de Janeiro: Análise Sinótica. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 13(03), 994-1012.
DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v13.3.p994-1012>
- CPRM - COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS (2004). *Cartografia Geológica Regional*. Recuperado de <https://www.cprm.gov.br>
- CPRM - COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS (2023). *Cartas de Suscetibilidade a Movimentos Gravitacionais de Massa e Inundações*. Recuperado de <https://www.sgb.gov.br>
- Da Silva, F. P., Rotunno Filho, O. C., Sampaio, R. J., Dragaud, I. C. D. A. V., de Araújo, A. A. M., da Silva, M. G. A. J., & Pires, G. D. (2019). Evaluation of atmospheric thermodynamics and dynamics during heavy-rainfall and no-rainfall events in the metropolitan area of Rio de Janeiro, Brazil. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 131(3), 299-311.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s00703-017-0570-5>
- De Carvalho, R. C. (2019). As migrações e a urbanização no Brasil a partir da década de 1950: um breve histórico e uma reflexão à luz das teorias de migração. *Revista Espinhaço* | UFVJM, 24-33.
DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.3345139>
- De Oliveira, M. T., & Saraiva, S. L. C. (2015). *Fundamentos de Geodésia e Cartografia*: Série Tekne. Bookman Editora.
- De Oliveira, N. S., Rotunno Filho, O. C., Marton, E., & Silva, C. (2016). Correlation between rainfall and landslides in Nova Friburgo, Rio de Janeiro—Brazil: a case study. *Environmental Earth Sciences*, 75(20), 1358. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-016-6171-7>
- de Souza Camargo, L., Silva, C., Pimentel, L.C.G., Silva, R.W., Basques Sobrinho, M.A., & Landau, L. (2022). Geotechnologies as decision support strategies for the identification of fire-susceptible areas in Rio de Janeiro State. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(10), 557.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10227-0>
- Dereczynski, C. P., Calado, R. N., Barros, A. B. (2017). Extreme Rainfall in The City of Rio de Janeiro: History from the 19th Century. *Anuário do Instituto de Geociências*, 40(2), 17 - 30.
DOI: https://doi.org/10.11137/2017_2_17_30
- Dereczynski, C. P., Oliveira, J. S. D., & Machado, C. O. (2009). Climatologia da precipitação no município do Rio de Janeiro. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 24(1), 24-38.
DOI: <https://doi.org/10.1590/S0102-77862009000100003>
- Do Amaral, A. M. C., Reis, F. A. G. V., Chaves, C. J., & DE Freitas, M. I. C. (2020). Uso da Geotecnologia para a análise da precipitação em Cubatão (SP): Correlação com a ocorrência de Deslizamentos. *Geociências (São Paulo)*, 39(1), 91-100.
DOI: <https://doi.org/10.5016/geociencias.v39i1.13796>

- Dourado, F., Arraes, T. C., & Fernandes, M. (2012). O Megadesastre da Região Serrana do Rio de Janeiro: as causas do evento, os mecanismos dos Deslizamentos e a distribuição espacial dos investimentos de reconstrução no pós-desastre. *Anuário do Instituto de Geociências*, 35(2), 43-54. DOI: https://doi.org/10.11137/2012_2_43_54
- EMBRAPA. (1995). *Procedimentos normativos de levantamentos pedológicos: Normas em uso pelo SNLCS*. Brasília, Serviço de Produção de Informação.
- Fernandes, N. F., Guimarães, R. F., Gomes, R. A. T., Vieira, B. C., Montgomery, D. R., & Greenberg, H. (2001). Condicionantes geomorfológicos dos deslizamentos nas encostas: avaliação de metodologias e aplicação de modelo de previsão de áreas susceptíveis. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 2(1). DOI: <https://doi.org/10.20502/rbg.v2i1.8>
- Ferreira, A. (2009). Favelas no Rio de Janeiro: nascimento, expansão, remoção e, agora, exclusão através de muros. *Revista Bibliográfica de Geografia y Ciencias Sociales*, 14(828). DOI: <https://doi.org/10.1344/b3w.14.2009.25822>
- Ferreira, M. C. (2016). *Iniciação à análise geoespacial*. SciELO-Editora UNESP.
- Fick, S. E., & Hijmans, R. J. (2017). WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International journal of climatology*, 37(12), 4302-4315. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.5086>
- Froude, M. J., & Petley, D. N. (2018). Global fatal landslide occurrence from 2004 to 2016. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18(8), 2161-2181. Garcia, M. I. M., Jara, S. D. M., Schlee, M. B., da Silva Júnior, O. P., & Netto, A. L. C. (2016). Uso do Solo e Vulnerabilidade Socioambiental na Sub-Bacia do Alto Rio das Pedras (Rio de Janeiro/RJ): Subsídios para Regeneração de Rios Neotropicais. *Revista do Departamento de Geografia*, 32, 29-38. DOI: <https://doi.org/10.11606/rdg.v32i0.115801>
- Guerra, A. J. T., Gonçalves, L. F. H., & Lopes, P. B. M. (2007). Evolução histórico-geográfica da ocupação desordenada e Deslizamentos no município de Petrópolis, nas últimas décadas. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 8(1). DOI: <https://doi.org/10.20502/rbg.v8i1.84>
- Guerra, S. C., de Araújo Abrantes, F. J., Neto, E. L. G. R., de Azevedo, J. B., Tai, D. W., Ferreira, M. M., & de Magalhães, M. S. (2019). *Suscetibilidade a deslizamentos do Brasil: primeira aproximação*. IBGE.
- Highland, L., & Bobrowsky, P. T. (2008). *The landslide handbook: a guide to understanding landslides*. Reston: US Geological Survey, 129 p.
- Ho, J. Y., Lee, K. T., Chang, T. C., Wang, Z. Y., & Liao, Y. H. (2012). Influences of spatial distribution of soil thickness on shallow landslide prediction. *Engineering Geology*, 124, 38-46. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2011.09.013>
- INEA - INSTITUTO ESTADUAL DO AMBIENTE DO RIO DE JANEIRO (2018). Portal GEOINEA. Recuperado de www.inea.rj.gov.br/portalgioinea
- IPT - INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (2014). *Mortes por deslizamentos no Brasil*. Banco de Acidentes. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas.
- IPT - INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (1991). *Ocupação de Encostas*. São Paulo: IPT, 216 p.
- Jones, F. O. (1973) Landslides in Rio de Janeiro and Serra das Araras escarpment, Brazil. U.S. *Geological Survey Professional Paper* 697, 42 p
- Júnior, F. A. C., & Dorigon, L. P. (2015). Análise dos deslizamentos de massa no “Morro do Bumba” através de imagens satélite. *Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista*, 11(5), 108-117. DOI: <https://doi.org/10.17271/1980082711520151188>
- León, N. O. (2020). *Landslide risk assessment for the state of Rio de Janeiro, Brasil (Dissertação (Mestrado)*. Curso de Science, Institute For Technology And Resources Management In The Tropics And Subtropics Leaders, Deutz, 60 f.

- Meirelles, E. D. O., Dourado, F., & Da Costa, V. C. (2018). Análise multicritério para mapeamento da suscetibilidade a Deslizamentos na Bacia do Rio Paqueta-RJ. *Geo UERJ*, (33), 26037. DOI: <https://doi.org/10.12957/geouerj.2018.26037>
- Mendonça, L. A. R., Vásquez, M. A. N., Feitosa, J. V., Oliveira, J. F. D., Franca, R. M. D., Vásquez, E. M. F., & Frischkorn, H. (2009). Avaliação da capacidade de infiltração de solos submetidos a diferentes tipos de manejo. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 14(1), 89-98. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522009000100010>
- Moura, C. R. W., Escobar, G. C. J., & Andrade, K. M. (2013). Padrões de circulação em *superfície e altitude associados a eventos de chuva intensa na Região Metropolitana do Rio de Janeiro*. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 28(3), 267-280. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0102-77862013000300004>
- Panchal, S., & Shrivastava, A. K. (2022). Landslide hazard assessment using analytic hierarchy process (AHP): A case study of National Highway 5 in India. *Ain Shams Engineering Journal*, 13(3), 101626. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.10.021>
- Peres, R. B., & Silva, R. S. D. (2013). Interfaces da gestão ambiental urbana e gestão regional: análise da relação entre Planos Diretores Municipais e Planos de Bacia Hidrográfica. *Revista Brasileira de Gestão Urbana*, 5(2), 13-25. DOI: <https://doi.org/10.7213/urbe.05.002.SE01>
- Pinto, R. C., Caneparo, S. C., & Passos, E. (2015). Avaliação Multicritério integrada aos Sistemas de Informações Geográficas para geração de cenário de suscetibilidade a deslizamentos rápidos em vertentes. *Jornadas Lusófonas de Ciências e Tecnologias de Informação Geográfica*, 1, 81-108. DOI: https://doi.org/10.14195/978-989-26-0983-6_4
- Pozzobon, M., da Silveira, C. T., & Curcio, G. R. (2019). Landslides Susceptibility Analysis in Blumenau, Southern Brazil: a Probabilistic Approach. *International Journal of Erosion Control Engineering*, 11(3), 63-72. DOI: <https://doi.org/10.13101/ijec.11.63>
- Rosa Filho, A. (2010). A problemática sócioambiental da ocupação urbana em áreas de risco de deslizamento da “Suíça Brasileira”. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 3(1), 33-40. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgef.v3i1.232610>
- Schramm, L. F. P. (2019). *Análise de suscetibilidade a movimentos de massa da microbacia do Córrego Gebien, bairro Valparaíso, Blumenau, SC (Trabalho de Conclusão de Curso – Graduação)*. Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Geologi. Recuperado de <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/204573>
- Seluchi, M. E., & Chou, S. C. (2009). Synoptic patterns associated with landslide events in the Serra do Mar, Brazil. *Theoretical and Applied Climatology*, 98(1-2), 67-77. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00704-008-0101>
- Seluchi, M. E., Beu, C. M., & Andrade, K. M. (2016). Características das Frentes Frias com potencial para provocar chuvas intensas na região serrana de Rio de Janeiro. *Revista Brasileira de Climatologia*, 18. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v18i0.45369>
- Seluchi, M. E., Chan Chou, S., & Gramani, M. (2011). A case study of a winter heavy rainfall event over the Serra do Mar in Brazil. *Geofísica internacional*, 50(1), 41-56. Retrieved September 8, 2023, from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0016-71692011000100005&lng=es&tlng=en
- Silva, F. F., Loureiro, H. A. S., & Silveira, T. S. (2011). Diagnóstico dos deslizamentos na cidade do Rio de Janeiro a partir das chuvas de abril de 2010: estudo de caso do Morro dos Prazeres. *Revista de Geografia (Recife)*, 27(3. Esp), 180-192.
- Silva, M. P. D., Souza, A. S. de, Silva, R. W. da, Amaral, S. S. do, Salles, K. C. N., & Camargo, L. S. (2021). Proposta para redistribuição das coordenadorias regionais de defesa civil ajustadas às regiões hidrográficas do Estado do Rio de Janeiro. *Revista Flammæ*, 7(19), 145. DOI: <http://dx.doi.org/10.17648/2359-4837/flammæ.v7n19.p145-176>

- Silva, W. L., & Dereczynski, C. P. (2014). Caracterização climatológica e tendências observadas em extremos climáticos no Estado do Rio de Janeiro. *Anuário do Instituto de Geociências*, 37(2), 123–13. DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2014_2_123_138
- Sipahi, S., & Timor, M. (2010). The analytic hierarchy process and analytic network process: an overview of applications. *Management Decision*, 48(5), 775–808. DOI: <https://doi.org/10.1108/00251741011043920>
- Stabile, R. A., Ferreira, A. L., de Carvalho, A. M., Siqueira, A. G., & Bitar, O. Y. (2013). Análise de fatores condicionantes de instabilizações em encostas como subsídio para a modelagem estatística da suscetibilidade a deslizamentos. In *14º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental–CBGE*.
- Tominaga, L. K. (2007). *Avaliação de metodologias de análise de risco a escorregamentos: aplicação de um ensaio em Ubatuba, SP* (Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo).
- Tominaga, L. K., Santoro, J., & do Amaral, R. (2009). *Desastres naturais: conhecer para prevenir*. Instituto geológico.
- Vaidya, O. S., & Kumar, S. (2006). Analytic hierarchy process: An overview of applications. *European Journal of operational research*, 169(1), 1–29. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.04.028>
- Vanacôr, R. N., & Rolim, S. B. A. (2012). Mapeamento da suscetibilidade a deslizamentos usando técnicas de estatística bivariada e sistema de informações geográficas na região nordeste do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 13(1). DOI: <https://doi.org/10.20502/rbg.v13i1.338>
- Vieira, B. C., & Gramani, M. F. (2015). Serra do Mar: the most “tormented” relief in Brazil. In *Landscapes and landforms of Brazil*, Springer, Dordrecht, 285–297. DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-017-8023-0_26
- Vogdrup-Schmidt, M., Olsen, S. B., Dubgaard, A., Kristensen, I. T., Jørgensen, L. B., Normander, B., Ege, C., & Dalgaard, T. (2019). Using spatial multi-criteria decision analysis to develop new and sustainable directions for the future use of agricultural land in Denmark. *Ecological Indicators*, 103, 34–42. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.03.056>

**USO DOS MAPEAMENTOS DE RISCO NOS PROCESSOS
DE REGULARIZAÇÃO FUNDIÁRIA NO BRASIL**
**USE OF RISK MAPPING IN LAND
REGULARIZATION PROCESSES IN BRASIL**

Alessandra Cristina Corsi

Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (Brasil)
Infraestrutura e Meio ambiente, Área de Negócios Cidades
ORCID: 0000-0003-2548-5131 accorsi@ipt.br

Eduardo Soares de Macedo

Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (Brasil)
Infraestrutura e Meio ambiente, Área de Negócios Cidades
ORCID: 0000-0001-5042-0925 esmacedo@ipt.br

Resumo: A dificuldade do acesso à moradia digna é um problema que atinge todas as cidades brasileiras. Atualmente, o aumento do número de pessoas vivendo em áreas de risco de escorregamento, enxurrada e inundação tem sido uma das características negativas do processo de urbanização e crescimento das cidades brasileiras. A regularização fundiária é um processo que visa legalizar a permanência de moradias que foram instaladas de forma irregular, clandestina ou quando não foi possível a titulação de seus ocupantes, mesmo que atendessem à legislação em vigor à época de sua implantação ou regularização. No artigo 39 da Lei 13.465/2017, em núcleos urbanos informais, ou de parcelas deles, situados em áreas de risco geológico-geotécnicos, somente é admitida a regularização fundiária por meio de aprovação do projeto, contendo estudos técnicos que possibilitem a eliminação, correção ou administração de riscos. Nesse contexto é de suma importância a

utilização do tipo correto de mapeamento. O mapeamento deve ser realizado casa a casa e conter a indicação da intervenção estrutural e não estrutural necessária para a redução do grau de risco.

Palavras-chave: Regularização fundiária, mapeamento, riscos.

Abstract: The difficulty of accessing decent housing is a problem that affects all Brazilian cities. Currently, the increase in the number of people living in areas at risk of landslides, flash floods and floods has been one of the negative characteristics of the urbanization and growth of Brazilian cities installed irregularly. Land regularization aims to legalise the presence of housing that was built irregularly, clandestinely or when it was not possible for the occupants to obtain the title of the property, even if they complied with the legislation in force at the time of its implementation or regularization. In Article 39 of Law 13.465/2017, in informal urban centres, or portions thereof, located in geological-geotechnical risk areas, land regularization is only allowed through project approval, including technical studies that allow the elimination, correction or risk management. Within this context, it is extremely important to use the correct type of mapping in the land regularization process. The mapping must be carried out house by house and contain the indication of the structural and non-structural intervention necessary to reduce the degree of risk.

Keywords: Land regularization, mapping, risks.

Introdução

A dificuldade do acesso à moradia digna é um problema que atinge muitos brasileiros em todas as nossas cidades. De acordo, com o levantamento preliminar dos aglomerados subnormais realizados pelo IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2020), foram identificados mais de 5 milhões de domicílios irregulares. O fenômeno da proliferação de precarização habitacional é identificado tanto nas grandes cidades, principalmente nas metrópoles, quanto naquelas de pequeno porte, especialmente no norte e nordeste do país.

As cidades brasileiras mostram de forma eloquente as desigualdades e as precárias condições de vida da população de baixa renda. Os mecanismos formais de acesso à terra e à moradia, seja pela via do mercado, seja pela via das políticas públicas, sempre foram insuficientes, atendendo, quando muito, apenas parte das necessidades reais da população e, usualmente, por meio de soluções habitacionais de baixa qualidade e com um escasso grau de acesso e de integração à infraestrutura e aos equipamentos urbanos. Nesse contexto, o acesso à habitação só se viabilizou por meio de processos de ocupação de terras ociosas, e da autoconstrução da moradia, gerando assentamentos insalubres, frequentemente ocupando áreas de risco e com a sua segurança física comprometida pela ausência de técnicas e de materiais adequados para a construção (Cardoso, 2016).

O conceito de moradia nos últimos anos sofreu importantes transformações, na medida em que não mais se restringe às edificações, inserindo a habitação em seu contexto mais amplo, abrangendo as condições de habitabilidade e de salubridade (Pagani *et al.*, 2016).

Atualmente, o aumento do número de pessoas vivendo em áreas de risco de escorregamentos, enchentes e inundações tem sido uma das características negativas do processo de urbanização e crescimento das cidades brasileiras, o que se verifica, principalmente, nas regiões metropolitanas (Ministério das Cidades/IPT, 2007). Fatores econômicos, políticos, sociais e culturais contribuem para o avanço e a perpetuação desse quadro indesejável. Em linhas gerais o problema das áreas de risco nas cidades brasileiras pode ser sintetizado nos itens abaixo:

- Crise econômica e social com solução a longo prazo;
- Política habitacional para baixa renda historicamente ineficiente;

- Ineficácia dos sistemas de controle do uso e ocupação do solo;
- Inexistência de legislação adequada para as áreas suscetíveis aos riscos mencionados;
- Inexistência de apoio técnico para as populações;
- Cultura popular de “morar no plano”.

A solução desse grave problema demanda muito tempo e recursos dada a enorme quantidade de áreas de risco e famílias afetadas. Uma das linhas de trabalho que tem sido adotada por várias administrações municipais é a regularização fundiária de terrenos em loteamentos irregulares ou de propriedade pública. É um processo que ao final provê um documento de posse do terreno à família que o habita, e a experiência tem demonstrado, que isso faz com que as condições da área melhorem substancialmente já que as famílias se sentem seguras para aplicar melhorias em suas moradias, diminuindo inclusive o risco (Martins, 2021).

Política pública essencial ao desenvolvimento socioeconômico e ambiental, ainda pouco reconhecida em sua função e em seu próprio conceito, a Regularização Fundiária Urbana é a urgência de um país que precisa planejar e mudar sua conotação “desordenada”, “invadida”, “degradada”, “insalubre” e insegura (Martins, 2021).

A irregularidade atinge, em regra, todos os municípios do Brasil. São cerca de 30 milhões de imóveis urbanos irregulares, situação que traz insegurança jurídica, precariedade na infraestrutura e danos urbanísticos, ambientais, jurídicos e sociais aos moradores (Martins, 2021). A ausência da regularização fundiária impacta diretamente no desenvolvimento socioeconômico e impede o desenvolvimento sustentável do município. O chamado “custo da não regularização” ao ente público e à população local ultrapassa questões fiscais, de sonegação e de renúncia de receitas pela não inserção dessas unidades imobiliárias na vida da cidade. Um núcleo irregular causa insegurança jurídica nas relações entre particulares, aumenta os gastos com a saúde pública em razão da ausência ou da precariedade de saneamento básico no interior da gleba, o que gera a contaminação de mananciais e impede, muitas vezes, a aplicação de verbas destinadas à estruturação de equipamentos públicos, às obras de infraestrutura e de esgotamento sanitário, tão vitais à integração da área como “bairro oficial” do município e ao bem-estar dos cidadãos. Conceituada como medidas jurídicas, urbanísticas, ambientais e sociais, destinada à incorporação dos núcleos

urbanos informais, ao ordenamento territorial urbano e à titulação dos ocupantes, a Regularização Fundiária deve ser entendida como uma política “guarda-chuva”, tendo em vista recepcionar em seu bojo a titulação dos ocupantes, a implementação de saneamento básico, o desenvolvimento sustentável, a melhoria das condições de habitabilidade e a integração social dos ocupantes à cidade formal (Martins, 2021).

A regularização fundiária é um processo que inclui medidas jurídicas, urbanísticas, ambientais e sociais com a finalidade de incorporar os núcleos urbanos informais ao ordenamento territorial urbano e à titulação de seus ocupantes, de acordo com a Lei nº 13.465/2017 (Brasil, 2017) e dos Decretos nº 9.310/2018 (Brasil, 2018a) e nº 9.597/2018 (Brasil, 2018b).

A regularização fundiária é um processo que visa legalizar a permanência de moradias que foram instaladas de forma irregular, clandestina ou quando não foi possível a titulação de seus ocupantes, mesmo que atendessem à legislação em vigor à época de sua implantação ou regularização. Os procedimentos para a Regularização Fundiária Urbana (Reurb) estão previstos, no âmbito federal, na Lei nº 13.465/2017 e nos Decretos regulamentadores nº 9.310/2018 e nº 9.597/2018. Duas modalidades de Reurb foram definidas: Reurb de Interesse Social (Reurb-S), quando envolver ocupações informais caracterizadas predominantemente por população de baixa renda; e Reurb de Interesse Específico (Reurb-E), aplicável aos outros casos que não se enquadram em Reurb-S.

O objetivo da regularização fundiária urbana de interesse social é a garantia de um dos direitos fundamentais do cidadão para uma vida digna, qual seja: o direito à moradia. Acrescentam-se, ainda, as condições urbanas às oportunidades econômicas, educacionais e culturais que a cidade oferece (Nunes e Figueiredo Junior, 2018).

Uma das etapas do processo de regularização fundiária trata dos Estudos Técnicos para Situações de Risco, no caso de áreas de risco de escorregamento de solo nos assentamentos, conforme artigo 35 da Lei 13.465 de 2017.

Em núcleos urbanos informais, ou de parcelas deles, situados em áreas de risco geológico-geotécnicos, somente é admitida a regularização fundiária por meio de aprovação do projeto, contendo estudos técnicos que possibilitem a eliminação, correção ou administração de riscos. Assim, a implantação das medidas indicadas nos estudos técnicos é condição indispensável à aprovação da regularização fundiária.

Na Reurb-S que envolva áreas de riscos que não comportem eliminação, correção ou administração, os Municípios deverão proceder à realocação dos ocupantes do núcleo urbano informal a ser regularizado. (Artigo 39, Lei 13.465/2017).

O objetivo deste artigo é mostrar a importância da utilização correta dos mapeamentos de riscos disponíveis atualmente e qual deve ser utilizado no processo de regularização fundiária, item importantíssimo nos estudos ambientais exigidos pela Lei 13.465/2017.

Regularização fundiária

A ocupação irregular do território urbano é um problema mundial. No caso do Brasil, o país experimentou, a partir da segunda metade do século passado, um crescimento urbano acelerado que gerou forte demanda por bens e serviços de caráter social. Aliado a esse quadro, o crescente processo de mercantilização das terras urbanas tornou-as cada vez mais valorizadas como ativos financeiros. O resultado foi a proliferação de aglomerações precárias, que passaram a ser a única opção de moradia para milhões de pessoas, tanto no centro quanto na periferia das cidades (Gomes e Steinberger, 2016).

Nas grandes cidades e metrópoles brasileiras, o acesso à moradia pela população de mais baixa renda, quase sempre se dá através da moradia em favelas, em fundos de vales ou encosta, por meio da autoconstrução das moradias e nos loteamentos ilegais periféricos. A presença de assentamentos irregulares é uma constante na grande maioria das cidades brasileiras, sejam pequenas, médias ou grandes (D'Ottaviano e Silva, 2009).

A promulgação da Lei de Terras do Império (Lei Nº 601, de 18 de setembro de 1850), representou a primeira legislação sobre regularização fundiária de terras públicas, sendo que só foi regulamentada em 1854, com o Decreto Nº 1.318 (D'Ottaviano e Silva, 2009).

Com a Lei Federal Nº 6.766/1979, o parcelamento do solo urbano passou a ter um regramento federal, objetivando a garantia dos direitos dos adquirentes de lotes e do adequado desenvolvimento urbano. A partir da Constituição Federal

de 1988, de acordo com o artigo 183, que tratou do usucapião constitucional de imóvel urbano e da concessão de uso, a regularização fundiária passou a ser tratada no âmbito da defesa do direito à moradia e do cumprimento da função social da cidade e da propriedade. Outro marco legal importante foi a edição do Estatuto da Cidade, Lei Nº 10.257/2001, que veio regulamentar o capítulo de política urbana da Constituição Federal de 1988 e trouxe importantes referências e regramentos para a Política Nacional de Desenvolvimento Urbano (Costa e Romeiro, 2022).

De acordo com Gomes e Steinberger (2016) o país vem avançando no tratamento da regularização fundiária. Como exemplos desse avanço, podem ser citadas a Emenda Constitucional 26/2000, que incluiu o direito à moradia entre os direitos sociais constitucionalmente garantidos, e a Medida Provisória 2.220/2001, que instituiu a concessão de uso especial para moradia, associando o direito à moradia à segurança da posse.

Em 2003, foi instituído pelo Ministério das Cidades o Programa Papel Passado, e em 2009 foi aprovada a Lei Nº 11.977/2009, que regulamentou, em âmbito nacional, a regularização fundiária (Costa e Romeiro, 2022).

A promulgação da Lei 11.977/2009, ao lado dos marcos normativos citados, permitiu o desenvolvimento de uma política nacional de regularização fundiária. Essa política teve por base o entendimento segundo o qual a regularização fundiária deveria articular medidas jurídicas, urbanísticas, ambientais e sociais. As medidas jurídicas (administrativas e judiciais) buscam adequar a situação de ocupação já existente às normas constitucionais e legais que regulam os direitos à posse, à propriedade, à moradia, ao meio ambiente, entre outros garantidos pelo ordenamento jurídico. As medidas urbanísticas envolvem estudos que compõem um projeto de urbanização para reordenamento do desenho urbano de uma determinada área. As medidas ambientais, por sua vez, destinam-se a garantir a preservação dos recursos naturais da área. Finalmente, as medidas sociais, priorizadas neste artigo, traduzem a realização dos direitos sociais garantidos constitucionalmente, o que torna claro o seu imbricamento com as medidas jurídicas (Gomes e Steinberger, 2016).

Segundo Fernandes (2023), desde 1979 uma ampla ordem jurídico-urbanística tem sido construída no Brasil sobre a questão da regularização fundiária de assentamentos consolidados em áreas urbanas. Essas ações têm sido traduzidas

em políticas públicas e programas de ação em todas as esferas governamentais, especialmente na esfera municipal.

A Lei federal N°13.465/2017 dispõe sobre a regularização fundiária rural e urbana, sobre a liquidação de créditos concedidos aos assentados da reforma agrária e sobre a regularização fundiária no âmbito da Amazônia Legal; e instituiu os mecanismos para aprimorar a eficiência dos procedimentos de alienação de imóveis da União; e deu outras providências. Sendo regulamentada pelo Decreto N° 9.310/2018 instituiu as normas gerais e os procedimentos aplicáveis à Regularização Fundiária Urbana e estabeleceu os procedimentos para a avaliação e a alienação dos imóveis da União (fig. 1).

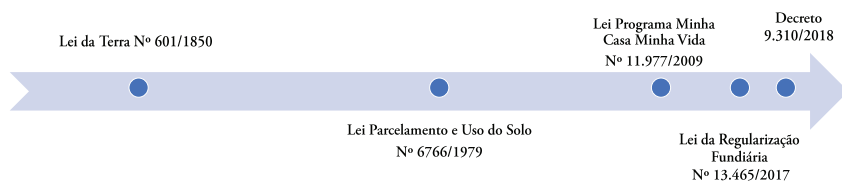
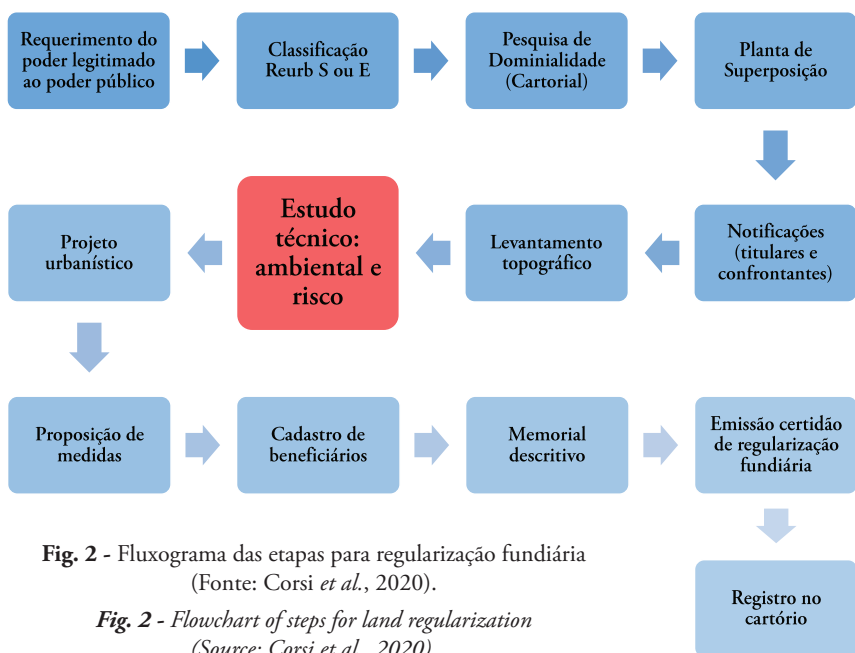


Fig. 1 - Linha do tempo dos marcos legais na regularização fundiária.

Fig. 1 - Timeline of legal frameworks in land regularization.

Uma das etapas do processo de regularização fundiária, que é obrigatório na Lei 13.465/17, trata dos Estudos Técnicos para Situações de Risco, no caso de áreas de risco de escorregamento de terra nos assentamentos; e o Estudo Técnico Ambiental, sempre que o núcleo, ou parte dele, estiver em área de preservação permanente (APP), em área de conservação de uso sustentável, ou de proteção de nascentes definidas pela União, Estados ou Municípios, conforme determinado pelo Código Florestal (Brasil, 2012) (fig. 2).

De acordo, com o Artigo 4, Parágrafos 4, 5 e 6 do Decreto nº 9.310/2018 (BRASIL, 2018a), o estudo técnico ambiental será obrigatório somente para as parcelas dos núcleos urbanos informais situados nas áreas de preservação permanente, nas unidade de conservação de usos sustentável ou nas áreas de proteção de mananciais e poderá ser feito em fases ou etapas e a parte do núcleo urbano informal não afetada pelo estudo poderá ter seu projeto de regularização fundiária aprovado e levado a registro separadamente.



No caso de Reurbanização de Interesse Social – Reurb-S, quando houver estudo técnico ambiental, este deverá comprovar que as intervenções da regularização fundiária implicam na melhoria das condições ambientais em relação à situação de ocupação informal anterior com a adoção das medidas nele preconizadas e deverá conter, no mínimo, os seguintes elementos previstos no Artigo 64 da Lei nº 12.651/2012 (Brasil, 2012):

- Caracterização da situação ambiental da área a ser regularizada;
- Especificação dos sistemas de saneamento básico;
- Proposição de intervenções para a prevenção e o controle de riscos geotécnicos e de inundações;
- Recuperação de áreas degradadas e daquelas não passíveis de regularização;
- Comprovação da melhoria das condições de sustentabilidade urbano-ambiental, considerados o uso adequado dos recursos hídricos, a não ocupação das áreas de risco e a proteção das unidades de conservação e das suas áreas de amortecimento, quando for o caso;

- Comprovação da melhoria da habitabilidade dos moradores propiciada pela regularização proposta; e
- Demonstração de garantia de acesso livre e gratuito pela população às praias e aos corpos d'água, quando couber.

A área mapeada utilizada como exemplo no presente artigo foi classificada como Reurb-S, dessa maneira o estudo compreendeu o mapeamento dos riscos de escorregamento e também a proposição de intervenções para a prevenção e o controle de riscos geotécnicos e de inundações.

Tipos de Mapeamentos de Risco

Desde a década de 1980, foram aplicados no Brasil vários produtos cartográficos, como por exemplo, as cartas geotécnicas.

Os mapeamentos de risco vêm sendo realizados utilizando diferentes metodologias, de acordo com os objetivos esperados. Dessa forma, tem-se os mapeamentos de risco com metodologia do Ministério das Cidades/IPT (2007) e a setorização de risco alto e muito alto como os mais aplicados no país e no Estado de São Paulo, dentro do universo da cartografia de risco.

Mapeamento de risco

Os aspectos tratados neste item são encontrados no livro “Mapeamento de riscos em encostas e margem de rios”, de autoria do Ministério das Cidades e do IPT em 2007 (Ministério das Cidades, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT, 2007). Ressalta-se que a metodologia de mapeamento de riscos de escorregamento e inundação constante neste livro é adotada nacionalmente pelo Governo Federal.

Em campo são observados e anotados em fichas de campo, diversos condicionantes geológico-geotécnicos importantes para a caracterização dos processos de instabilização de encostas em áreas urbanas, como: geometria da

encosta, tipos de materiais mobilizados (solo / rocha / lixo / detritos, etc.), tipologia de escorregamentos ocorrentes ou esperados, tipo de talude (natural, corte ou aterro), condição de escoamento e infiltração de águas superficiais e servidas (QUADRO I). Estes parâmetros estão relacionados à análise da possibilidade de ocorrência de processos de movimentos de massa na área de estudo.

QUADRO I - Principais dados levantados em campo para caracterizar os setores de risco.

TABLE I - Main data collected in the field to characterize risk sectors.

CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL	
• Unidade de análise: Encosta/Margem de córrego • Tipos de construção: Alvenaria/Madeira/Misto • Condição das vias • Encosta natural • Talude de corte/Aterro • Presença de maciço rochoso • Altura da encosta, ou talude, ou maciço rochoso • Inclinação da encosta, ou talude, ou maciço rochoso • Distância da moradia com relação ao topo/base da encosta, talude, maciço rochoso • Estruturas em solo/rocha desfavoráveis • Presença de blocos de rocha/matacões • Presença de Depósitos de encosta: aterro/lixo/entulho	
EVIDÊNCIAS DE MOVIMENTAÇÃO	ÁGUA
• Trincas na moradia • Trincas no terreno • Degraus de abatimento • Muros e paredes “embarrigados” • Árvores, postes e muros inclinados • Solapamento de margem • Cicatrizes de escorregamentos • Fraturas no maciço rochoso	• Concentração de água de chuva em superfície • Lançamento de água servida em superfície • Vazamento de tubulação • Fossa • Surgências d’água • Sistema de drenagem superficial: inexistente/ precário/satisfatório
VEGETAÇÃO NA ÁREA OU PROXIMIDADES	MARGENS DE CÓRREGO
• Presença de árvores • Vegetação rasteira (arbustos, capim, etc) • Área desmatada • Área de cultivo	• Tipo de canal (retificado/natural), (retilíneo/meandrante), (assoreado/lixo/entulho) • Altura do talude marginal • Distância da moradia com relação ao topo do talude marginal

Fonte: Adaptado de Ministério das Cidades, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (2007).
Source: Adapted from Ministry of Cities, Technological Research Institute of the State of São Paulo (2007).

Nas fichas também são considerados aspectos específicos, tais como o padrão construtivo das habitações (madeira, alvenaria, misto), e a posição das mesmas em relação ao raio de alcance dos processos ocorrentes ou esperados. Observa-se ainda o estágio da ocupação atual, incluindo aspectos gerais sobre infraestrutura

urbana implantada, tais como: condições das vias (pavimentada, terra, escadarias), sistemas de drenagem e esgoto, pontes e outras melhorias urbanas. Assim, além da caracterização dos processos de instabilidade, se contempla parâmetros de análise da vulnerabilidade em relação às formas de uso e ocupação presentes nas áreas de risco. Desta forma, são identificados os processos de instabilização predominantes, delimitando e caracterizando os setores de risco.

Os setores de risco são delimitados, em campo, sobre fotografias oblíquas de baixa altitude obtidas nos voos de Drone, e classificados segundo os seus graus de risco.

Os critérios de julgamento da probabilidade de ocorrência dos processos de instabilização relativos a escorregamentos, bem como os parâmetros analisados para o desenvolvimento dos trabalhos, são apresentados no QUADRO II, a partir de Ministério das Cidades; Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT (2007). Esta classificação foi modificada pelo IPT com a inclusão de SM – Setor de Monitoramento. Este quadro mostra que os graus de risco são classificados em quatro níveis, sendo, Risco Baixo (R1) e Risco Médio (R2) (ambos reunidos em Setor de Monitoramento), Risco Alto (R3) e Risco Muito Alto (R4), os quais apresentam descrições que mencionam tanto a possibilidade ou potencialidade de desenvolvimento do processo de movimento de massa (especificamente, neste caso, os escorregamentos), como a vulnerabilidade do meio (Corsi e Macedo, 2022).

Como especificado anteriormente, os setores mapeados como sendo de graus de risco Baixo (R1) e Médio (R2) recebem indicações de medidas estruturais e não estruturais semelhantes. Para facilitar o entendimento e uso dos mapeamentos, neste trabalho os setores assim classificados foram agrupados nos denominados Setores de Monitoramento (SM), estando ocupados ou não por moradias. Tal ação visa identificar a necessidade de se trabalhar o planejamento da expansão urbana diante do contexto que afeta gravemente as cidades brasileiras, as quais vêm apresentando durante décadas formas indevidas de utilização dos espaços urbanos. É um meio de se trabalhar a ausência de processos de planejamento, visando atender a interesses coletivos de forma ampla, buscando conjuntamente a proteção ambiental e o direito do cidadão a uma cidade mais sustentável.

O exemplo de mapeamento de risco, apresentado abaixo, foi realizado segundo a metodologia do Ministério das Cidades (Ministério das Cidades/IPT, 2007),

QUADRO II - Critérios utilizados para determinação dos graus de probabilidade de ocorrência de processos de instabilização do tipo escorregamentos em encostas ocupadas e solapamento de margens de córregos.

TABLE II - Criteria used to determine the degrees of probability of instability processes such as landslides occurring on occupied slopes and the undermining of stream banks.

GRAU DE RISCO		DESCRIÇÃO
SM Setor Monitoramento	R1 Baixo	Os condicionantes geológico-geotécnicos predisponentes e o nível de intervenção no setor são de BAIXA POTENCIALIDADE para o desenvolvimento de processos de escorregamentos e solapamentos. NÃO HÁ INDÍCIOS de desenvolvimento de processos de instabilização de encostas e de margens de drenagens. É a condição menos crítica. Mantidas as condições existentes, NÃO SE ESPERA a ocorrência de eventos destrutivos no período de 1 ano.
	R2 Médio	Os condicionantes geológico-geotécnicos predisponentes e o nível de intervenção no setor são de MÉDIA POTENCIALIDADE para o desenvolvimento de processos de escorregamentos e solapamentos. Observa-se a presença de ALGUMA(S) EVIDÊNCIA(S) de instabilidade, porém incipiente(s). Mantidas as condições existentes, É REDUZIDA a possibilidade de ocorrência de eventos destrutivos durante episódios de chuvas intensas e prolongadas, no período de 1 ano.
R3 Alto		Os condicionantes geológico-geotécnicos e o nível de intervenção no setor são de ALTA POTENCIALIDADE para o desenvolvimento de processos de escorregamentos e solapamentos. Observa-se a presença de SIGNIFICATIVA(S) EVIDÊNCIA(S) de instabilidade. Mantidas as condições existentes, é PERFEITAMENTE POSSÍVEL a ocorrência de eventos destrutivos durante episódios de chuvas intensas e prolongadas, no período de 1 ano.
R4 Muito Alto		Os condicionantes geológico-geotécnicos predisponentes e o nível de intervenção no setor são de MUITO ALTA POTENCIALIDADE para o desenvolvimento de processos de escorregamentos e solapamentos. As evidências de instabilidade SÃO EXPRESSIVAS E ESTÃO PRESENTES EM GRANDE NÚMERO E/OU MAGNITUDE. É a condição mais crítica. Mantidas as condições existentes, é MUITO PROVÁVEL a ocorrência de eventos destrutivos durante episódios de chuvas intensas e prolongadas, no período de 1 ano.

Fonte: Corsi e Macedo (2022) / Source: Corsi and Macedo (2022).

onde se tem a delimitação dos setores em foto vertical (fig. 3) e a delimitação em foto oblíqua, obtida por Drone (fig. 4).

A partir da delimitação dos setores de risco pode-se fazer a indicação das intervenções estruturais e não estruturais necessárias para a redução do grau de risco, elaborando desse modo o Plano Municipal de Redução de Risco. As intervenções estruturais são delimitadas diretamente na imagem de drone e representam as obras necessárias para a redução do grau de risco e não para a urbanização da área (fig. 5).

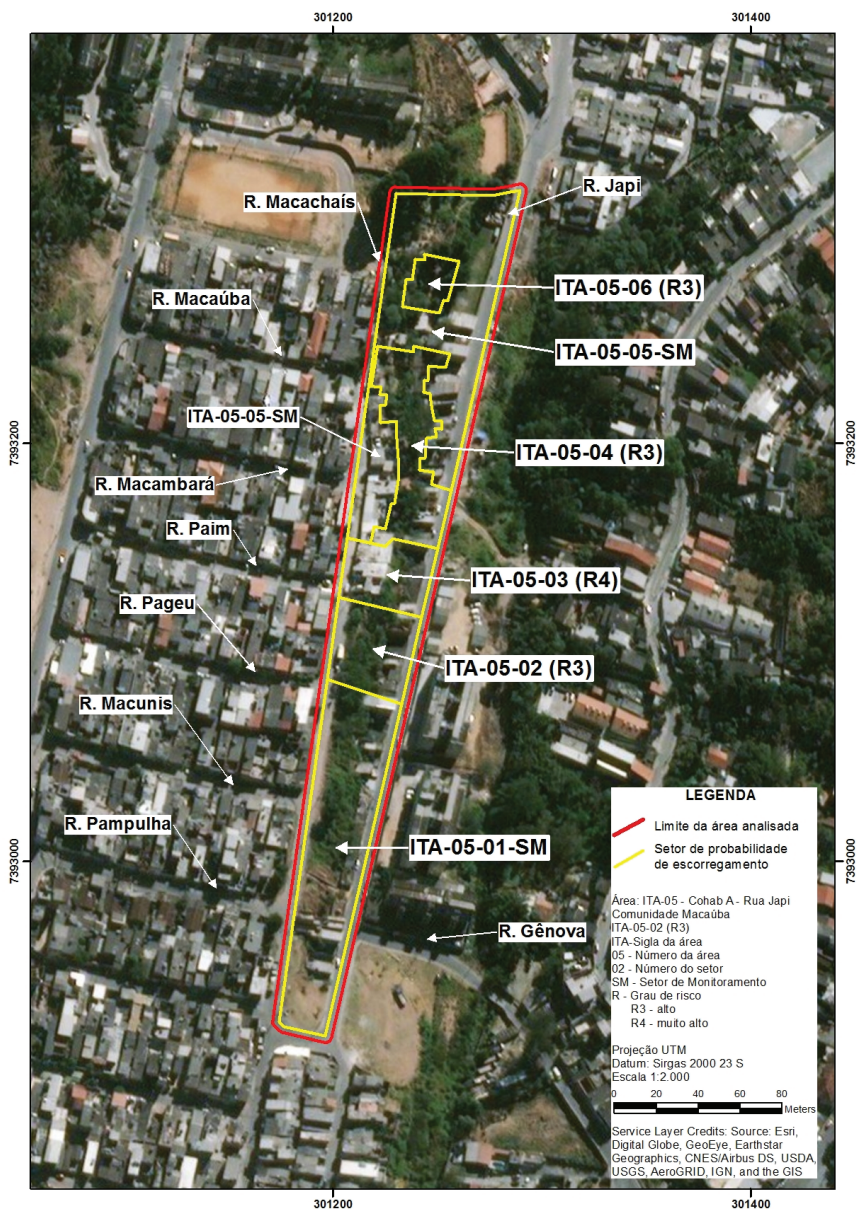


Fig. 3 - Exemplo de mapeamento de risco com a delimitação dos setores e a definição do grau de risco para área no município de Itapevi (Fonte: IPT, 2018).

Fig. 3 - Example of risk mapping with sector delimitation and definition of risk degree for an area of Itapevi Municipality (Source: IPT, 2018).



Fig. 4 - Exemplo de mapeamento de risco com a delimitação dos setores e a definição do grau de risco para uma área no município de Itapevi em imagem de drone (Fonte: IPT, 2018).

Fig. 4 - Example of risk mapping with sector delimitation and definition of risk degree for an area of Itapevi Municipality, using drone image (Source: IPT, 2018).



Fig. 5 - Exemplo de mapeamento de risco com a indicação de intervenções estruturais, para uma área no município de Itapevi (Fonte: IPT, 2018).

Fig. 5 - Example of risk mapping indicating structural interventions, in an area of Itapevi Municipality (Source: IPT, 2018).

Setorização de risco alto e muito alto

No âmbito do governo federal, a partir do Plano Pluri-Anual (PPA) 2012/2016, os mapeamentos passaram a ser coordenados pela Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil (SEDEC) do Ministério da Integração que optou por uma metodologia de menor detalhe desenvolvida e executada pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM), a partir do método Ministério das Cidades / IPT (2007). Nesta setorização temos o mapeamento de setores de alto e muito alto risco. No Estado de São Paulo o IPT também executa este mapeamento para a Defesa Civil Estadual, como uma cooperação com os levantamentos estaduais.

A setorização é muito útil para as defesas civis municipais, principalmente nos municípios carentes de informações técnicas, bem como para o monitoramento e alerta de desastres realizado pelo Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais (CEMADEN).

O exemplo desse mapeamento, apresenta a delimitação de um setor de risco alto mapeado no município de Santo Antonio do Pinhal, Estado de São Paulo (fig. 6).

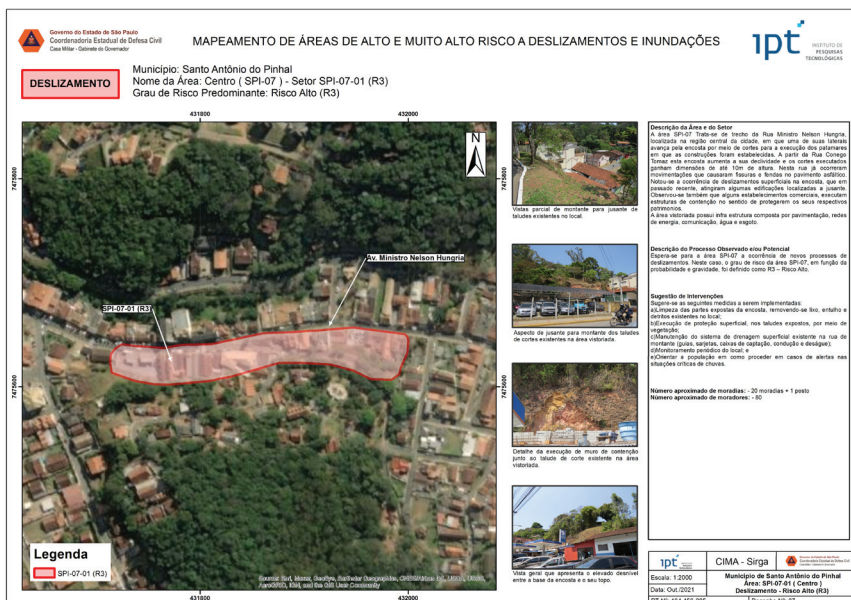


Fig. 6 - Exemplo de setorização de risco (Fonte: IPT, 2021).

Fig. 6 - Example of risk sectorization (Source: IPT, 2021).

Exemplo de mapeamento de risco com foco em urbanização e regularização fundiária

O Jardim Europa está inserido no Núcleo Cota 200, localizado na região da Serra do Mar, às margens da Rodovia Anchieta, no KM 50 da pista ascendente, no município de Cubatão, SP (fig. 7). Este dista aproximadamente 7,9 km do centro da cidade de Cubatão.

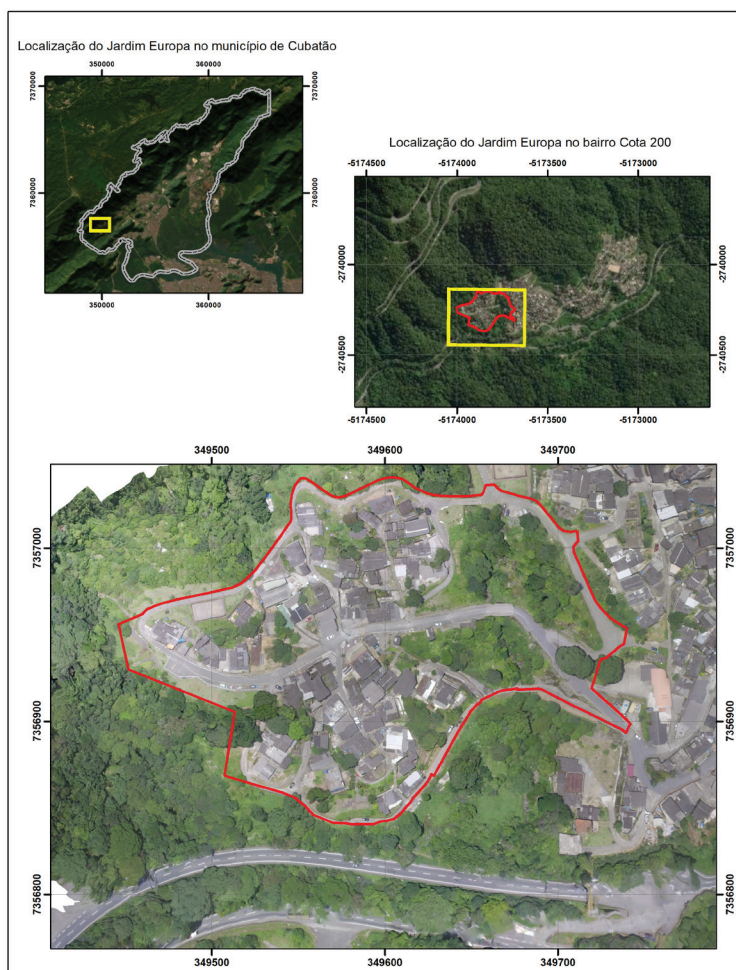


Fig. 7 - Localização do Jardim Europa, em Cubatão (Fonte: IPT, 2020).

Fig. 7 - Location of Jardim Europa in Cubatão (Source: IPT, 2020).

O bairro Cota 200, assim como os outros bairros Cota, teve sua origem nos acampamentos de operários do Departamento Estadual de Estradas de Rodagem (DER), construídos nas encostas da Serra do Mar, que trabalharam na construção da rodovia Anchieta em meados do século XX. Os nomes dos bairros Cota 500, 400, 200, 100 e 95 fazem referência às cotas topográficas em relação ao nível do mar. Estes foram o principal alvo do Programa de Recuperação Socioambiental da Serra do Mar. No bairro Cota 200 foram atendidas 7.532 famílias. Destas, 5.232 antes instaladas em áreas de risco, foram removidas para conjuntos habitacionais em outros pontos da cidade de Cubatão e da Baixada Santista, e 2.300 foram beneficiadas com obras de reassentamento, na própria área do bairro.

No mapeamento de risco geológico-geotécnico, na área do Jardim Europa, foram delimitados três setores de risco, sendo um de Risco Médio (R2), um de Risco Alto (R3) e um de Risco Muito Alto (R4) (fig. 8). Abaixo segue a descrição dos setores (IPT, 2007):

- Setor S1- Risco Alto – Área com poucas casas e terreno com declividade inferior a 30% de rampa, constituído de solo saprolítico, sendo cortada pela mesma linha de drenagem do setor S1. A declividade é menor, no entanto, há o agravante da existência de um degrau formando uma queda d' água que impõe maior energia quando esta atinge a área deste setor. Este degrau é resultado da conformação originada pela estrutura rochosa (parede rochosa vertical). No local há registros de rupturas em aterro de material detrítico e carregamento de material por erosão;
- Setor S2 – Risco Muito Alto – Área com baixa taxa de ocupação com casas localizadas na porção sudeste. Possui uma rampa para leste, na direção de uma linha de drenagem. Essa drenagem apresenta solapamentos de margem decorrentes de enxurradas e depósitos de fragmentos rochosos de dimensões variadas. Uma das vertentes é composta por uma lente de solo coluvionar. A porção leste do setor, a qual é ocupada, possui uma declividade com mergulho ortogonal à linha de drenagem. O terreno possui uma inclinação superior a 35%, com corte e aterros superiores a 2,0m de altura. Os aterros são constituídos de material rochoso e solo areno-siltoso. Em algumas casas observou-se lançamento de água servida na própria encosta. As casas mais

próximas à inflexão do terreno requerem uma atenção maior no tocante a movimentações de massa, sendo esperados processos de desestruturação por erosão e rupturas planares;

- Setor S3 – Risco Muito Alto – Este setor possui na porção central um baixo estrutural devido a processos erosivos laminares. As moradias foram construídas junto aos taludes de corte expondo solo saprolítico e apresentam altura aproximada de 3,0m. A declividade é superior a 35%, com percentual de 50% de solo exposto. A falta de disciplinamento da água superficial, principalmente junto às casas de madeira são fatores preocupantes para o período de chuvas. São esperadas rupturas circulares dos taludes de corte e a desagregação dos aterros devido à concentração de águas pluviais e saturação do maciço;
- Setor S4 – Risco Muito Alto – Na porção superior deste setor observa-se a inflexão da encosta, sendo o material presente constituído de depósitos de material de colúvio-tálus. A área delimitada consiste em casas de alvenaria assentadas em patamares de corte e aterro superiores a 3,0m de altura. Os taludes compõem-se basicamente de material detrítico. Neste setor, esperam-se rupturas localizadas em taludes de corte sub-verticais e movimentações de blocos rochosos de grandes dimensões depositadas na área central do setor, bem como de blocos depositados cota acima deste setor;
- Setor S5 – Risco Médio – Esta área possui um adensamento alto de casas e uma consolidação urbana média (F2). A declividade é inferior a 30% de rampa, não sendo observadas concentrações de água, nem a presença de linhas de drenagem. O escoamento superficial está sendo conduzido, embora de forma precária, por sistemas de canaletas, construídas na evolução da consolidação da área. Os cortes sub-verticais possuem alturas em torno de 2,0 a 3,0m.

Segundo Costa (2014) foram realizadas intervenções no bairro Cota 200 para consolidação geotécnica, pavimentação, drenagem e rede de distribuição de água e rede coletora de esgoto. As intervenções implantadas envolveram obras para redução do grau de risco e urbanização da área (QUADRO III).

Para dar prosseguimento no processo de regularização fundiária de uma porção do Bairro Cota 200, denominado Jardim Europa foi realizado o mapeamento de risco, conforme preconizado na Lei 13.465/2017.

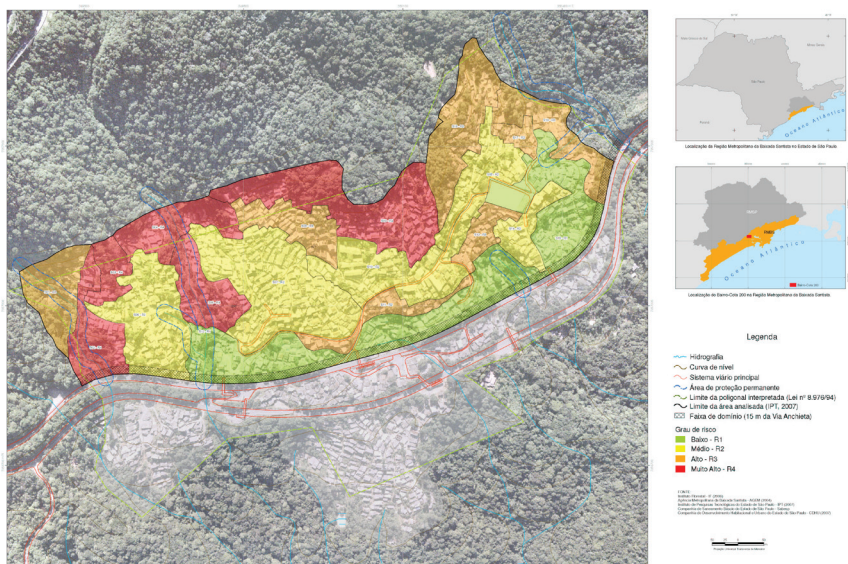


Fig. 8 - Setores de risco geológico-geotécnico, bairro Jardim Europa, Cubatão (Fonte: IPT, 2007).

Fig. 8 - Geological-geotechnical risk sectors in Jardim Europa, Cubatão (Source: IPT, 2007).

QUADRO III - Intervenções realizadas no bairro Cota 200, Cubatão.

TABLE III - Interventions carried out in the Bairro Cota 200, Cubatão City.

Intervenção	Tipo	Metragem
Consolidação geotécnica	Drenos horizontais profundos	5.150m
	Pano de pedra	1.100m ²
	Muro de pedra	3.910m ²
	Solo grampeado	7.056m ²
Pavimentação	Ruas	10.500m ²
	Vielas de pedestres	16.500m ²
Drenagem	Canaleta de drenagem retangular com tampa	4.690m
Rede de distribuição de água	Rede distribuição água	2.905m
	Adutora	2.965m
Rede coletora de esgoto	Rede coletora de esgoto	4.260m
	Estações elevatórias	5 unidades
	Linhas de recalque	756m
	Emissário	3.129m
	Interceptor oceânico	2.018m

(Fonte/Source: Costa, 2014).

Foram mapeados dois setores, sendo o setor 200-01-01 classificado como SM - Setor de Monitoramento e o outro, setor 200-01-02, como setor de Risco Alto (R3) (QUADRO IV). Na área foram observadas cinco moradias de madeira, sendo três delas moradias tradicionais da época da construção da Rodovia Anchieta, e duas delas construídas com materiais de baixo padrão construtivo (barracos). As moradias foram numeradas de M1 a M3 (moradias tradicionais) e M4 e M5 (barracos) (fig. 9).

QUADRO IV - Setores mapeados por área de risco, o grau de risco e número de moradias/edifícios.

TABLE IV - Sectors mapped by risk area, degree of risk and number of houses/buildings.

ÁREA	SETOR	GRAU DE RISCO	Número de moradias / edifícios por setor
Jardim Europa	200-01-01	SM - Setor de Monitoramento	70 moradias, 1 igreja, 1 viveiro e 2 garagens
	200-01-02	R3 - Alto	1

(Fonte/Source: IPT2020).



Fig. 9 - Delimitação dos setores mapeados e localização das moradias de madeira (M1 a M5) (Fonte: IPT, 2020).

Fig. 9 - Delimitation of mapped sectors and location of wooden houses (M1 to M5). (Source: IPT, 2020)..

Conclusão

O mapeamento de risco com foco na reurbanização deve seguir os preceitos da metodologia do Ministério das Cidades/IPT, onde são delimitados os setores de risco e também a indicação das medidas necessárias para redução do grau de risco.

Importante lembrar que a titularidade da moradia pela Lei deve ser efetuada somente nas áreas onde não haja a incidência de setores de risco.

Desse modo, a setorização de risco alto e muito alto, com foco em grandes áreas, não é o tipo de mapeamento indicado no caso da regularização fundiária, pois não representam mapeamentos casa a casa e sim áreas com características similares. Esses mapeamentos podem ser indicativos de locais que no caso de Reurb deverão ter os estudos detalhados.

A Regularização Fundiária é um processo que ao final provê um documento de posse do terreno à família que o habita. Além da óbvia segurança jurídica levada às famílias, a experiência mostra que as condições da área melhoram substancialmente já que as famílias se sentem seguras para aplicar melhorias em suas moradias, diminuindo inclusive o risco. Dado o grande déficit habitacional no país e o número elevado de famílias vivendo em condições precárias e de risco, a regularização tem se mostrado um instrumento bastante eficaz tanto para a solução habitacional como para as situações de risco.

As condições de exposição aos riscos, principalmente os de caráter natural como deslizamentos e inundações, têm dificultado a regularização fundiária nas nossas cidades e precisam ser reconhecidas por meio de mapeamentos e resolvidas com intervenções estruturais. É preciso deixar claro que o mapeamento de riscos e a solução dos problemas detectados é uma das condicionantes para o processo de regularização existindo ainda o condicionante ambiental, a infraestrutura urbana e as questões de propriedade das áreas na sua forma integral.

O importante é compreender que cada um dos instrumentos tem a sua vocação e deve ser para isto utilizado. Os mapeamentos de áreas de risco, por exemplo, não são adequados para determinar o planejamento da cidade, mas são ferramentas importantes no processo de regularização fundiária, para a implementação das intervenções estruturais para redução do grau de risco e também para o

monitoramento das áreas de risco durante a operação do Plano Preventivo de Defesa Civil e nos atendimentos de emergência. A setorização de risco é de suma importância para o monitoramento e por isso é utilizado pelo Cemaden e pelas defesas civis.

Referências bibliográficas

- Brasil. Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nº 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória nº 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília, 28 mai. 2012 (2012). Alterada pela Lei nº 12.727, de 17 de outubro de 2012, publicada no *Diário Oficial da União*, Brasília, 18 out. 2012.
- Brasil. Lei nº 13.465, de 11 de julho de 2017. Dispõe sobre a regularização fundiária rural e urbana, sobre a liquidação de créditos concedidos aos assentados da reforma agrária e sobre a regularização fundiária no âmbito da Amazônia Legal; institui mecanismos para aprimorar a eficiência dos procedimentos de alienação de imóveis da União; altera as Leis nºs 8.629, de 25 de fevereiro de 1993, 13.001, de 20 de junho de 2014, 11.952, de 25 de junho de 2009, 13.340, de 28 de setembro de 2016, 8.666, de 21 de junho de 1993, 6.015, de 31 de dezembro de 1973, 12.512, de 14 de outubro de 2011, 10.406, de 10 janeiro de 2002 (Código Civil), 13.105, de 16 de março de 2015 (Código de Processo Civil), 11.977, de 7 de julho de 2009, 9.514, de 20 de novembro de 1997, 11.124, de 16 de junho de 2005, 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 10.257, de 10 de julho de 2001, 12.651, de 25 de maio de 2012, 13.240, de 30 de dezembro de 2015, 9.636, de 15 de maio de 1998, 8.036, de 11 de maio de 1990, 13.139, de 26 de junho de 2015, 11.483, de 31 de maio de 2007, e a 12.712, de 30 de agosto de 2012, a Medida Provisória nº 2.220, de 4 de setembro de 2001, e os Decretos-Leis nºs 2.398, de 21 de dezembro de 1987, 1.876, de 15 de julho de 1981, 9.760, de 5 de setembro de 1946, e 3.364, de 21 de junho de 1941; revoga dispositivos da Lei Complementar nº 76, de 6 de julho de 1993, e da Lei nº 13.347, de 10 de outubro de 2016; e dá outras providências.
- Brasil a. Decreto nº 9.310, de 15 de março de 2018. Institui as normas gerais e os procedimentos aplicáveis à Regularização Fundiária Urbana e estabelece os procedimentos para a avaliação e a alienação dos imóveis da União.
- Brasil b. Decreto nº 9.597, de 4 de dezembro de 2018. Altera o Decreto nº 9.310, de 15 de março de 2018, que institui as normas gerais e os procedimentos aplicáveis à Regularização Fundiária Urbana e estabelece os procedimentos para a avaliação e a alienação dos imóveis da União, e o Decreto nº 7.499, de junho de 2011, que regulamenta o Programa Minha Casa, Minha Vida, instituído pela Lei nº 11.977, de junho de 2009.
- Cardoso, A. L. (2016). Assentamentos Precários no Brasil: Discutindo conceitos. Capítulo 1. *A problemática dos assentamentos precários no Brasil urbano e suas interfaces*.
- Corsi, A. C., Macedo, E. S. de e Guimarães, M. P. P. (2020). Geotecnologias como ferramentas de auxílio regularização fundiária. *1º Simpósio Brasileiro Cidades + Resilientes*. São Paulo, SP.
- Corsi, A. C. e Macedo, E. S. de (2022). Mapeamentos de risco para regularização fundiária. 17º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental (17, 2022: on-line). *Anais do 17º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e ambiental* (Livro eletrônico), São Paulo, SP: ABGE, 2022. ISBN 978-65-88460-09-2.

- Costa, F. C. V. da e Romerio, P. S. (2022). Capítulo 9 – marcos regulatórios da regularização fundiária urbana. In: Krause, C. e Denaldi, R. (Ed.) *Núcleos urbanos informais: abordagens territoriais da irregularidade fundiária e da precariedade habitacional*. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea). ISBN 978-65-5635-044-8. DOI: <http://dx.doi.org/10.38116/978-65-5635-044-8/capitulo9>
- D'Ottaviano, M. C. L., e Silva, S. L. Q. (2022). Regularização fundiária no Brasil: velhas e novas questões. *Planejamento e Políticas Públicas*, (34). URL: <http://www.ipea.gov.br/ppp/index.php/PPP/article/view/172>
- Fernandes, E. (2023). Desafios da regularização fundiária urbana no contexto da Lei Federal nº13.465/2017 *O Social em Questão*, vol. 1, núm. 55, Enero, pp. 241-260 Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro Rio De Janeiro, Brasil
- Gomes, A. M. I. dos S. e Steinberger, M. (2016). Democracia participativa na regularização fundiária urbana: o projeto Lomba do Pinheiro, Porto Alegre. *Interfaces Sociologias* 18 (41)
DOI: <https://doi.org/10.1590/15174522-018004121>
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (2020). Aglomerados subnormais 2019: classificação preliminar e informações de saúde para o enfrentamento à COVID-19. *Notas técnicas*. Rio de Janeiro: IBGE.
- IPT - INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (2007). Análise de riscos geológicos e geotécnicos dos bairros Cota 95/100, 200 e 400 no município de Cubatão, SP. Relatório de Andamento – Bairro – Cota 200). *Relatório Técnico nº 97082-205*.
- IPT - INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (2018) Mapeamento de áreas de risco de escorregamento e áreas de preservação permanente (APP) no município de Itapevi, SP. *Relatório Técnico nº 154.250-205*.
- IPT - INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (2020) Estudo técnico ambiental para subsidiar a regularização fundiária do Jardim Europa, sito no Bairro Cota 200, município de Cubatão, SP. *Relatório Técnico nº 159.236-205*.
- IPT - INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (2021) Mapeamento de áreas de alto e muito alto risco a deslizamentos e inundações, Município de Santo Antônio do Pinhal. *Relatório Técnico nº 164.458-205*.
- Martins, D. A. (2021). Ações Afirmativas Sobre a Regularização Fundiária em Área de Mananciais. In: *Ensaio para Construção de Consenso na Ocupação de Áreas de Proteção de Mananciais na Região Metropolitana de São Paulo*. OAB.
- MINISTÉRIO DAS CIDADES/INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS – IPT (2007). *Mapeamento de riscos em encostas e margem de rios*. Carvalho, C.S., Macedo, E.S., Ogura, A.T. (eds). Ministério das Cidades; Instituto de Pesquisas Tecnológicas, Brasília. (ISBN 978-85-60133-81-9), 176 p.
- Nunes, M. A. da C. e Figueiredo Junior, C. M. A. (2018). Regularização fundiária urbana: estudo de caso do bairro Nova Conquista, São Mateus-ES. *Revista de Direito da Cidade*, vol 10, n.º 2, ISSN 2317-7721, 887-9156.
- Pagani, E. B. S., Alves, J. de M e Cordeiro, S. M. A. (2016). Política de regularização fundiária urbana de interesse social em Londrina, Paraná. *Revista Katalysis*, v. 19, nº 2, 184-193.

**RISK PERCEPTION AMONG YOUNG PEOPLE
LIVING IN AN AREA HIGHLY SUSCEPTIBLE TO
LANDSLIDES AND FLOODING:
NOVA FRIBURGO, RIO DE JANEIRO STATE, SE-BRAZIL**

**PERCEPÇÃO DE RISCO ENTRE JOVENS QUE
VIVEM EM ÁREA DE ALTA SUSCETIBILIDADE A
DESLIZAMENTOS E INUNDAÇÕES:
NOVA FRIBURGO, RIO DE JANEIRO, SE-BRASIL**

Tomás Coelho Netto Duck¹

ORCID: 0000-0002-2867-9110
tomascnetto@ufrj.br

Lethicia Silva Machado¹

ORCID: 0009-0006-3567-3493
lethiciasmachado@ufrj.br

Leonardo Esteves de Freitas^{1, 2}

ORCID: 0000-0003-4751-356X
leonardo.esteves@fiocruz.br

Ana Luiza Coelho Netto³

ORCID: 0000-0003-0158-0994
ananetto@acd.ufrj.br

Luna Constanza Monteiro Moreno¹

ORCID: 0009-0002-6999-7315
lunamoreno@ufrj.br

¹Univ. Federal do Rio de Janeiro (Brasil)
Laboratório de Geo-Hidroecologia
e Gestão de Riscos (Geoheco)

²Observatório de Territórios Sustentáveis
e Saudáveis da Bocaina da Fundação
Oswaldo Cruz

³Univ Federal do Rio de Janeiro (Brasil)
Instituto de Geociências,
Departamento de Geografia

Abstract: This study aims to identify the risks and amenities in the event of a disaster in the São Geraldo school-basin area where the pilot school is located, based on the perception of the school community. The school selected for carrying out the project is in the lower part of the catchment, in the São Geraldo neighbourhood in the municipality of Nova Friburgo – RJ. This was one of the municipalities most affected by the great disaster of January 2011 and profound transformations have already been achieved

there due to the increasing density of housing and buildings related to urban use. Sixty-nine (69) students participated in this process and two hundred and forty (240) points of interest related to risks were identified, indicated by the students, and including the viewpoint of two teachers, the school principal, and a local council member. In the community emergency map, one hundred and forty-three (143) points were found. This experience seeks to demonstrate that the role of the school in the DRR (disaster risk reduction) is to become a space for dialogue and social participation, valuing the plurality of diverse types of knowledge.

Keywords: School, disaster risk reduction, environmental education, participatory mapping, disaster.

Resumo: O objetivo deste estudo é identificar os riscos e as amenidades no caso de um desastre, na bacia-escola de São Geraldo, onde se situa a escola piloto, a partir da percepção da comunidade escolar. A escola selecionada para a realização do projeto se situa na parte inferior da bacia, localizada no bairro São Geraldo no município de Nova Friburgo - RJ, um dos mais atingidos pelo grande desastre de janeiro de 2011 e onde já ocorreram profundas transformações devido ao adensamento de moradias e construções relacionadas ao uso urbano. Participaram deste processo, sessenta e nove (69) alunos e foram apontados duzentos e quarenta (240) pontos de interesse relacionados aos riscos, indicados pelos alunos, incluindo a perspectiva de dois professores, do diretor escolar e do vereador local. No mapa de emergência comunitário, foram encontrados cento e quarenta e três (143) pontos. Essa experiência pretende demonstrar que o papel da escola na RRD é tornar-se um espaço de diálogo e de participação social, valorizando a pluralidade dos diferentes saberes.

Palavras-chave: Escola, redução de risco de desastres, educação ambiental, mapeamento participativo, desastre.

Introduction

The climate crisis is a global scale process, however, its effects are perceived on a local scale and negatively impact the functioning of the community, interrupting or reducing a series of ecosystem services, including water supply, food production, and the increased pressure on natural resources, in addition to increasing the incidence of climate-related disasters, such as floods and gravitational mass movements, configuring one of the greatest challenges for modern society (IPCC 2007; Oliveira *et al.*, 2021). According to Selby (1993), gravitational mass movements are movements of masses of soil, rock, and debris down a slope due to the force of gravity. When water or ice is used to trigger this process, it can reduce the shear strength of the slope and, consequently, cause it to collapse.

Disasters associated with extreme rainfall induced by gravitational mass movements and flooding have increased dramatically in recent decades, probably due to climate change related to variations in rainfall patterns, reinforced by the intensification of urbanization and disorderly occupation of the territory, as well as the lack of suitable public policies of prevention (Freitas & Coelho Netto, 2016), which increase the susceptibility of these phenomena and expose the population to these threats. When this affects a social system, we have a socio-environmental (Duek *et al.*, 2020), which can also be seen from the point of view of the interaction between natural and social components.

In Brazil, the Disaster Risk Management (DRM) process is implemented by the Civil Defense, with the participation of the entire civil society. For the implementation of measures with the objective of *Disaster Risk Reduction* (DRR), it is important to create competent public policies and public bodies in the implementation of mitigating measures, through risk management. DRM aims to reduce, prevent, control, and manage risks and build a set of actions inserted in the context of planning. In Brazil, disaster risk reduction actions are the responsibility of the Civil Defense, including the society's participation in prevention; emergency and disaster preparedness; response, and reconstruction (National Civil Defense Policy, 2007). Civil Defense has institutions at the three levels of power (federal, state, and municipal) and all are linked to the *National Civil Defense System* (in Brazil, SINPDEC).

Civil Defense actions for preventing and responding to disasters can be classified into two categories: structural actions, when they are related to direct intervention measures, such as the stabilization of slopes or canalization of rivers and drainage systems, among others; and also in non-structural actions related to questions about the study and improvement of susceptibility mapping to hazards and risks and measures such as collective awareness through formal and non-formal education, to mitigate the vulnerability of people exposed to landslides and floodings. According to Acselrad (2006), vulnerability is associated with exposure to risks and establishes the greater or lesser susceptibility of people, places, infrastructures, or ecosystems to suffering some particular type of harm. According to Wejnert (2002), risk perception should be analyzed as a culturally constructed and interpreted phenomenon, permeated by beliefs/representations that constitute the organizing axis of reactions and behaviors. It is therefore necessary to guarantee a democratic space that ensures that people's perceptions are taken into consideration, including the needs of each individual exposed to risk and, bringing their demands to the fore.

In studies related to DRM, it is common to use the spatial clipping from the drainage basin as it facilitates the observation of spatial connections related to local and/or regional issues concerning the socio-environmental impacts associated, directly or indirectly, with the climate crisis. It is an area delimited by its drainage dividers and operates as an open system that receives (climate) energy impulses and converges the residual flows (liquids, solids, and solubles) from the higher areas to the lower areas, towards a common exit point (outlet) (Coelho Netto, 1994). In territorial planning and the context of risk management, this geomorphological unit favors the recognition of internal spatial articulations in which upstream impacts tend to propagate their effects downstream, allowing a connection between the slopes and the valley bottoms drained by the network of river channels that interconnect with each other to reach the terminal reservoirs.

This logic is justified as far as most human occupations in mountainous regions are concentrated at the bottom of the valleys, which are areas that receive flows from the slopes, constituting dangerous areas for the exposed population and, therefore, with enormous potential for disaster risks related to floods and landslides.

The spatial articulation between the landslides on the slopes and the floods along the network of river channels was very evident in the catastrophic disaster of the mountainous region of Rio de Janeiro state, Brazil, in January 2011, in response to the detonation and propagation of numerous shallow translational slides that occurred on steep slopes and propagated debris flows along rivers, increasing the magnitude of impacts downstream. In this event, the municipalities of *Nova Friburgo*, *Terresópolis*, and *Petrópolis* were the most affected, showing a general lack of preparation to face this phenomenon, which is natural in mountainous regions, and which, therefore, constitutes a permanent natural threat in this region of the State of Rio de Janeiro (Freitas & Coelho Netto, 2016).

Coelho Netto *et al.* (2013) describe this last catastrophic event of January 2011 in Nova Friburgo and its surroundings. The critical rainfall varied spatially from 140 mm/day to more than 240 mm/day, with rainfall equal to or greater than 160 mm/day inducing 3,622 landslides within an area of 423 km². Dourado *et al.* (2012) point out that the YPU-INEA Station, close to the city center, recorded 241.8 mm of rain, accumulated over the 24 hours of the day of the event and with a maximum peak of 61.8 mm/h at midnight on January 12th. Among the immeasurable losses and damages, the official number of 964 deaths stands out, in addition to dozens of people missing (Coppetec, 2014) and more than 50,000 homeless, in addition to about one million people directly and indirectly affected (Dourado *et al.*, 2012). It is estimated that the damage resulting from this disaster was in the order of BRL 4.8 billion, including the destruction of public and private structures (World Bank, 2012).

Among the non-structural actions aimed at Disaster Risk Reduction (DRR), environmental education in the formal and non-formal scope focused on this matter is of great relevance, as it has a positive impact on preventing the risk of disaster to which the population is exposed, in addition to favoring the creation of a culture of disaster prevention in the community. According to Hamann (2019), the impacts generated by disasters are directly proportional to regional development, influenced by the economic, social, cultural, and environmental levels, and from this perspective, awareness and education campaigns still in the early years of basic education need to be expanded.

However, the initiatives developed within the school environment using participatory methodologies that value the integration between technical-scientific knowledge and local knowledge are still incipient, intending to produce new knowledge resulting from the promotion of dialogue between knowledge of a different nature. This methodology has contributed to encouraging the autonomy of communities to make decisions regarding actions to be implemented during the DRM process (Freitas and Coelho Netto, 2021). It is believed that DRR measures should be more comprehensive in the school environment, involving a participatory process seen as a reference in the propagation of innovative ideas for coping with and living with extreme rainfall events, characteristic of mountainous regions.

The Sendai Framework considers children and young people as agents of change, who must have space and ways to contribute to disaster risk reduction, under the legislation, national practice, and educational curricula. Although it is a priority role of the State, the document also considers DRR to be a responsibility to be shared between governments and stakeholders (UNISDR, 2015), such as schools and teaching and research institutions. These institutions have joined efforts to involve the school community in prevention activities and carry out studies that contribute to elucidating the role of schools in DRR actions (Ribeiro *et al.*, 2015; Freitas & Coelho Netto, 2017; Jiménez-Denis *et al.*, 2017; Hamann *et al.*, 2019; Matsuo *et al.*, 2019). In their studies, Gianasi *et al.* (2014) conducted participatory mapping with the school community to identify problems and potentialities in the spatial area of a drainage basin, adding the knowledge of students and teachers and a technician from the Municipal Environment Department in the region. According to the authors, when the population is included in this process, they have the opportunity to reflect on their status as a citizen within society, boosting collective involvement in the search for resolutions and improvements. By conducting participatory mappings, society directly denounces the most urgent problems, drawing the attention of public authorities and pressing for actions that can bring some kind of resolution and response to these issues. SILVA & VERBICARO (2016) also emphasize that participatory maps become instruments of struggle and social representation, including perspectives from communities, bringing empowerment, and political and social mobilization, in addition to strengthening collective actions and promoting awareness of the challenges of the territory.

The present work aims to evaluate the perceptions of adolescents from a pilot school basin located in the São Geraldo neighborhood, in the urbanized lower valley of the d'Antas Drainage basin. Questions about urban risks were formulated by taking the term "risk" in a broad sense, so that students could highlight any situation that children and adolescents consider, in their daily routines, a threat and/or vulnerability to their well-being and that of their community, in the present or the near future. Children's perceptions are often different from adults. Teenagers especially feel blocked from talking freely and openly with adults, even their parents, about certain topics. Participatory Geographic Information Systems (SIGP) and Participatory Mapping are often successfully used in processes related to DRM (Freitas & Nunes, 2020; Marchezini *et al.*, 2017) and are also important methods to involve and interact with young people as they are facilitators of this interaction as young people do not consider them threatening as a way of exposing themselves to adults. These methods have proved to be adequate in recent research conducted in Denmark, Finland, New Zealand, Sweden, the UK, and the USA (Preto *et al.*, 2016). Therefore, this study is seen as a way of stimulating participation in the disaster risk reduction process, with the use of geotechnologies to prepare and interpret participatory mappings. The main purpose is to promote a culture of safety throughout the school community, involving students and their families, employees, teachers, and residents of the school's neighborhood, located in a territory of high susceptibility to landslides and high socioeconomic vulnerability, which notoriously enhances the impacts generated by disasters.

Methodology

Study area – the d'Antas drainage basin and the São Geraldo sub-basin

The d'Antas Drainage basin (53 km²) has a topographic difference level of 1,500 m and is an important contributor to the *Bengala* River, a tributary of the Grande River that converges to the Dois Rios River, a direct tributary of the *Paraíba* do Sul River, on the right bank. This basin was heavily hit by hundreds of landslides in the catastrophic

event in January 2011, accumulating heavy damage and losses. It is inserted in an urban expansion area in the central zone of the municipality of Nova Friburgo, in the so-called *Serrana* Region of the State of Rio de Janeiro (fig. 1). According to Coutinho (2015), about 23,000 people inhabit this basin, being highly concentrated in the urban area of the lower valley – this represents 11% of the total population of the municipality.

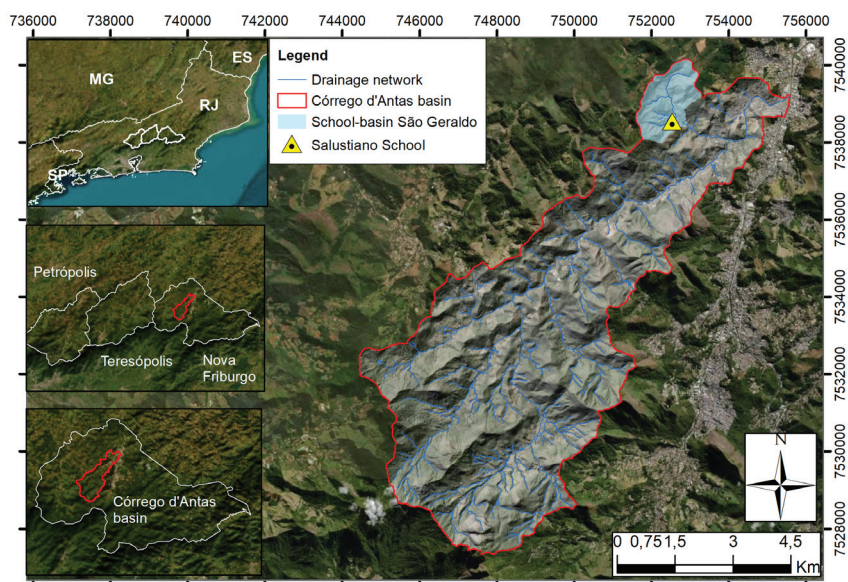


Fig. 1 - Location of the pilot school, State School Salustiano José Ribeiro Serafim, in the lower valley of the D'Antas Drainage basin (yellow triangle) in Nova Friburgo-RJ. The school is part of the São Geraldo school catchment, which delimits a drainage sub-basin in the d'Antas Creek drainage.

Fig. 1 - Localização da escola piloto, Escola Estadual Salustiano José Ribeiro Serafim, localizada no baixo vale da bacia do Córrego D'Antas (triângulo amarelo) em Nova Friburgo-RJ. Detalhe da bacia-escola São Geraldo que delimita uma sub-bacia drenante inserida na bacia hidrográfica do Córrego d'Antas.

The neighborhood of São Geraldo, in Nova Friburgo, began its formation in the early fifties, from small farms subdivided from a coffee farm that existed in the region. From the eighties to the present day, it is a place with cheap land prices, which, consequently, attracted many low-income people from other municipalities, such as *Sumidouro*, *Bom Jardim*, *Cantagalo*, *Madalena*, *Nova Iguaçu*, *São Gonçalo*, the latter more distant.

“According to data from the association of residents of São Geraldo, the transformation of a typically rural neighborhood into an urban neighborhood already brings in its framework the cultural and social clash, with different visions of worlds and various experiences built in their vast majority of hopelessness, humiliation, the lack of more opportunities, often due to low schooling and low culture” (Santos, 2007a, p. 16).

Kobiyama *et al.* (2007) defined a school-basin as any experimental basin that is used for scientific research and environmental education activities (fig. 2). Mendiondo (2002) presented three main components of the school-basin: science, technology, and innovation; this idea arises from the combination of innovation (Basin Committee) with science, which generates hydrosolidarity. According to Falkenmark & Folke

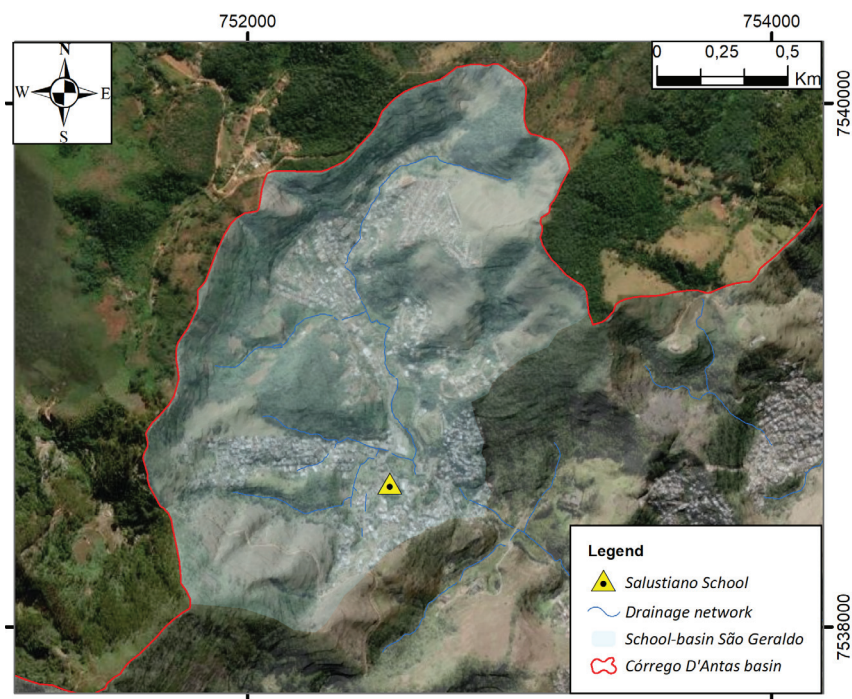


Fig. 2 - Map with greater detail of the São Geraldo school catchment area, which is in the D'Antas Drainage basin, with the location of the pilot school and its drainage network.

Fig. 2 - Mapa com maior detalhamento da bacia-escola de São Geraldo, inserida na bacia do Córrego D'Antas, com a localização da escola piloto e sua rede de drenagem.

(2002), hydro-solidarity is the mediation of conflicts of interest with a solidary balance of human livelihood interests, regarding upstream and downstream activities in the drainage basin, and ethics. The main purpose is to promote a culture of safety throughout the school community, involving students and their families, employees, teachers, and the community surrounding the school, located in a territory of high susceptibility to gravitational mass movements and high socioeconomic vulnerability, which notoriously enhances the impacts generated by disasters.

Methodological Basis

This participatory mapping work, from the perspective of Disaster Risk Management, is based on the Ecology of Knowledge, aiming at a collective construction for the formulation of new contents and procedures for apprehending and disseminating knowledge from scientific, fundamental, and applied research, as well as extension studies aimed at meeting local demands, and also integrating popular knowledge accumulated through experience and popular beliefs, as advocated in the Ecology of Knowledge (Santos, 2007b). In this context, it is possible to make a connection between the destabilizing epistemology and the critique of the ecology of knowledge to Paulo Freire's pedagogical thinking, which defends understanding the students' world in the sense of valuing experiences, opening the possibility of education opposing reproduction (Penna, 2014). Another methodology that supports the study is action research, which is based on the search for knowledge associated with a process of acting on reality (Ketele & Roegiers 1993; Engel 2000; Thiollent 2006). According to Thiollent (2011), action-research is a type of social research associated with concrete actions dedicated to solving, in a cooperative and participatory way, a collective problem in which researchers and representative participants are involved. It should be mentioned that actions must be established to meet the interests and needs of the territory and all interested parties.

According to Engel (2000), action research has specific characteristics, among which research must become a learning process for all participants and there must be no separation between the subject and the research object. The researcher

appears in this context as a social practitioner, to verify the effectiveness of a new procedure. In teaching, it has as its object human actions considered unacceptable by the teacher, under certain aspects, which are susceptible to change, demanding a practical response.

Action-research is considered situational, as it seeks to diagnose a specific problem in a specific situation, to have a relevant result of the practice. There is, however, the possibility of generalizing the results of the action research as other searches from separate places might lead to equivalent results. Action research is self-evaluative, its modifications are constantly evaluated throughout the intervention process, and it is also a cyclical process in which the final stages are used to improve the previous stages. Moura and Ventura (2018) indicate that the pedagogical processes must be guided by dialogic practices because according to the Freirean thought, it is relevant so that the didactic transposition does not fall into a void or be a mere mechanical reproduction of content, but that the knowledge and culture of the various actors involved, and the plurality of knowledge are respected and valued.

Methodological Procedures

The present study starts with a survey on the knowledge of the territory surrounding the school, where most students live. This initial stage (fig 3) was elaborated from meetings with the school's pedagogical team and researchers involved, aiming to obtain information about the territory and also propositional ideas to guide strategic actions aimed at reducing the risks of disasters. Students, in turn, showed interest in participating in a class with active learning methodologies, as well as enthusiasm in building a mapping with possibilities to bring improvements to the community. After this stage, a survey of all relevant bibliographies was conducted, together with the action plan and the schedule of all mapping activities with the Director and later with the classes of the first year of High School. In this collective work, it was also possible to count on the participation of a council member, a resident with strong roots in the São Geraldo neighborhood, in addition to being politically active in this locality.

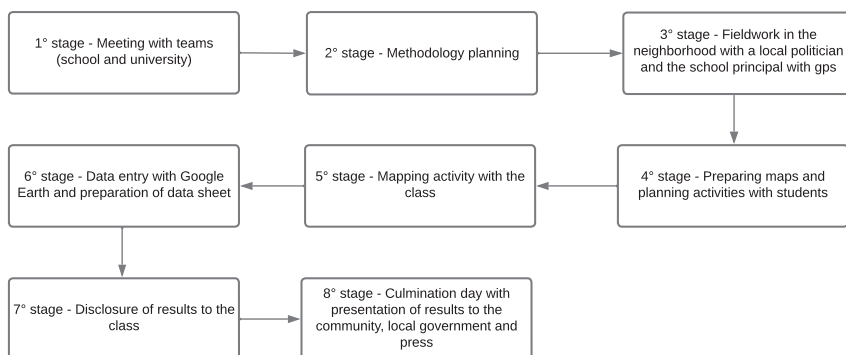


Fig. 3 - Methodological flowchart with the operational stages of the study.

Fig. 3 - Methodological flowchart with the operational stages of the study.

A total of sixty-nine students participated in this process, enrolled in four classes of the first year of high school, in addition to members of the school's pedagogical team, including the director and other teachers. Activities included conducting fieldwork with the council member mentioned above, who showed interest in participating in the project, in addition to demonstrating his willingness to bring improvements to the neighborhood based on this study. It is noteworthy that the young students who participated in the study, aged between 14 and 16 years, were still children at the time of the catastrophic disaster in January 2011, being popularly considered “children of the tragedy” of 2011.

In the mapping stage, fieldwork was conducted with the local council member and the school director, and points of interest related to gravitational mass movements and floods were mapped, adding relevant information for this study. The application used in this stage of the work was *Geotracker*, which served to mark the points through the Global Positioning System (GPS) of the cell phone device and mark the route taken.

After these processes, the students conducted participatory mapping. For the operationalization, the class was divided into three groups and each of these groups received letter-images printed in A0 format to identify the issues raised from the territory (photo 1). Subsequently, the Google Earth application was used to insert the points raised, as well as the spatialization and visualization of the data,

transforming them into a formal map. To achieve the proposed result, the activities were divided into two stages. In the first, a group dynamic was conducted so that they could identify five problems and/or risks in the neighborhood and write them down on a piece of paper. In the second, they were asked to point out in the satellite images the location of the problems and/or risks that they had written on the paper and also points related to emergencies, such as emergency shelters, food points, heavy machinery for earth removal, health centers and people in situations of greater vulnerability, such as the elderly and people with special needs, that is, useful information for actions in an emergency of climatic origin.

The use of satellite images has multiple advantages, such as it reduces the number of trips to the field, it avoids restrictions on the use of computers and the participants find it very pleasant and stimulating, generating lively discussions about the georeferenced places and situations. In Gianasi *et al.* (2014), the use of printed satellite images was also used to place the study participants on the site and facilitate the marking of points, however, printed images in A3 size were used. In the present study, the A0 printing format was chosen so that the map information could be observed in more detail, increasing the possibility of more accurate markings, and facilitating the transfer of these points to Google Earth later.

With the use of a larger and clearer image, the students found it easier to locate themselves spatially (photo 1), making the work faster and more dynamic. It is important to reaffirm that, in this study, there was no right or wrong result, since the main objective of the activity was to take advantage of these perceptions to insert a discussion about how we live in environments where the overlapping of risks is part of the reality and that we need measures of reduction and prevention, thus contributing to the perception of disaster risk among students. A facilitating aspect of the full process is the performance of the first author of this study as a Basic Education teacher linked to the Secretary of Education of the State of Rio de Janeiro, having an institutional bond in the pilot school, a fact that contributed to the success of this research. The entire process was accompanied by the authors, providing the fundamental and necessary support for conducting practical activities in the classroom, helping in the process stimulating the individual perception of each participant, and encouraging them to think critically about the territory in which they live.



Photo 1 - Students mapping the items requested by the researchers (Photography by Tomás Coelho Netto Duek taken on 19/06/2023).

Fot. 1 - Alunos, no momento da atividade de mapeamento dos itens solicitados pelos pesquisadores (Fotografia de Tomás Coelho Netto Duek, tirada a 19/06/2023).

The next step in the conduction of this research is It is also planned (at the time of this publication, it had not been conducted) for the organization of a culmination day at the end of the 2024 school year, with the presentation of these results and others produced throughout the year and related to DRR for that region. This day activity will involve the participation of researchers from the university, the management team, and teachers from the school, the presence of the council member and partner of the project, students, parents, and residents, and an invitation will be made to the press to do the work of dissemination.

Results and Discussion

The points raised by the students (fig. 4), for the creation of the risk map, were grouped into four classes and their respective frequencies to facilitate the analysis of the results obtained, as shown in fig. 5. Sixty-nine (69) students from

two classes of the first year of high school at State School Salustiano José Ribeiro Serafim participated in this process, in addition to contributions from the director and the local council member. Two hundred and forty (240) points of interest related to risks were pointed out through an A0-format image letter, among them, 36.66% were risks related to urban infrastructure, 34.58% were risks related to meteorological events, 19.16% with risks related to urban violence, 9.58% pointed to problems such as high cost of living and abandoned houses and cars and lack of doctors at health centers, as can be seen in the graph below (fig. 5).

After the mapping process was done with the maps, the team of researchers inserted the data into the Google Earth application to facilitate the analysis and spatial visualization through the produced map. Risks related to urban infrastructure stood out the most, especially among students, indicating a low perception related to geo-hydrological risks, which was the second most mentioned critical problem in this area. A point that came up spontaneously by the students was the places of violence related to robbery and drug trafficking, showing in detail the particularities of this territory, and leaving the researchers surprised since it was something unexpected but that was duly recorded according to the methodology proposal.



Fig. 4 - Risk Map made by students at the pilot school.

Fig. 4 - *Mapa de Riscos elaborado pelos alunos da escola piloto.*

In the view of the students, the neighborhood has many problems related to streets with holes, lack of garbage and debris collection, as well as problems with lighting and quality water distribution. Points related to landslides and floods appear as critical aspects of the neighborhood. However, it was the second most pointed item on the map, demonstrating that it is a concern shared by students who recognize that they are events that cause social and environmental conflict, generating losses and damages. This item needs greater attention from the government and the population since it causes deaths and great economic losses and is part of an area of high susceptibility to gravitational mass movements and floods.

Veyret (2007) defines risk as "the threat of danger for those who are subject to it and perceive it as such, existing only in an individual and a community who perceive it through mental representations. According to Carvalho *et al.* (2018), the understanding is that risk is relational and can only be thought of (and consequently managed) based on the perception of individuals, and their ways of seeing and living with the world.

Risk perception depends on individual experiences (Slovic and Peters, 2005), but can be socially constructed according to factors such as: culture, social conditions, schooling, degree of trust in intuitions and authorities (Schimdt *et al.*, 2013; Tavares, 2011). In this way, risk perception must be interpreted in the light of a psychosocial analysis, taking into account the individual and collective aspects of those exposed to risk.

Most risk situations in all categories correspond to real and concrete concerns, contextualized in their daily lives. The students revealed that they have a detailed knowledge of their surroundings, such as the areas around their home and school, and demonstrated a great geographical notion about the space where they live. In the first contact with the satellite image, they found it quite easy to locate the school and their houses, based on individual and collective observation. During the marking of the requested points, this clarity in spatial perception was also present, so that even when marking in distinct groups, the students were able to point out the same points marked in the same places on the satellite image. The spatial notion observed during the study is also a great facilitator for the students to demonstrate all the territorial knowledge, such as, for example, the indication of the preferred places of coexistence, which is a relevant item in studies that value community participation.

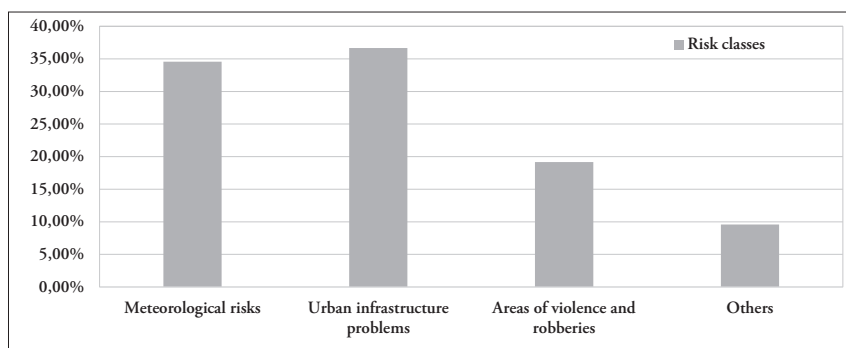


Fig. 5 - Frequency of established classes and their respective points indicated by students.

Fig. 5 - Frequência das aulas estabelecidas e suas respectivas pontuações indicadas pelos alunos.

In the Community Emergency Map (fig. 6), one hundred forty-three (143) points related to emergencies were found, such as emergency shelters (support points), community food points, health posts, heavy machinery for the removal of land, vulnerable groups, and water springs. This product was made by the students with places that had the potential to protect themselves in the event of an emergency, including emergency shelters (support points), community food points, and houses where the elderly and people with special needs live.

In fig. 7, we see the frequency with which the students indicated these points. Out of a total of 143 points ($n = 100\%$), 27.27% of the points were for community emergency shelters, in this regard, students' own homes that had a covered terrace or enough space to shelter their friends from the class if needed were suggested. Another relevant point of the study was the indication of 25.17% of points indicating houses containing vulnerable people (elderly people, women living alone, and people with some type of disability) who need help from the authorities in the imminence of a disaster.

This map was designed so that they could have some kind of planning in the case of an event, it was an exercise to articulate and think of strategies about what to do and how to act, including the possibility of escaping to a colleague's house in case of extreme need, as was the case with the support points inserted on the map. The mapping of criteria defined as risks/adversities and potentialities/amenities is a

methodology already adopted in other studies on participatory mapping (Gianasi *et al.*, 2014, Araújo, 2000). Work using this methodology was an important part of the preparation of the “Community-based and technical-scientific contingency plan for the D’Antas Drainage basin – Nova Friburgo/RJ”, (Freitas *et al.*, 2021), a relevant document for the prevention and response to disasters in the area of the present study. These studies demonstrated that this approach achieves the understanding of the participants well and generates very satisfactory results.

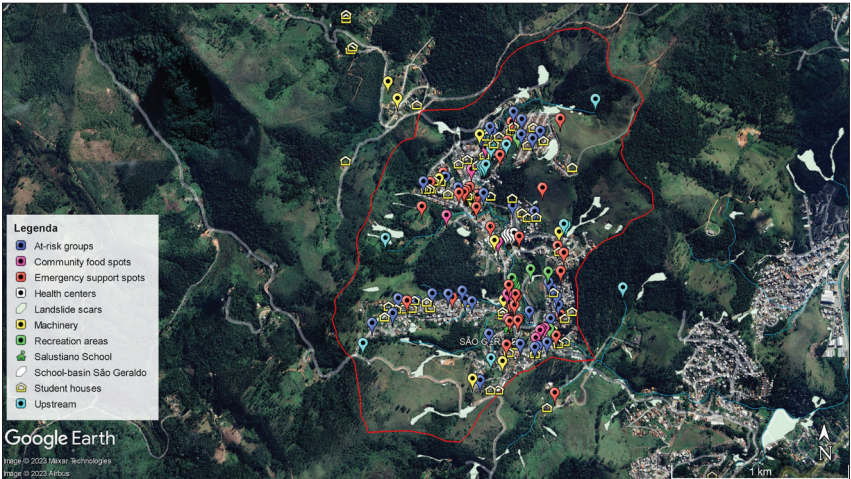


Fig. 6 - Emergency Map created by students at the school with the help of Google Earth.
Fig. 6 - Mapa de Emergência elaborado pelos alunos da escola com auxílio do Google Earth.

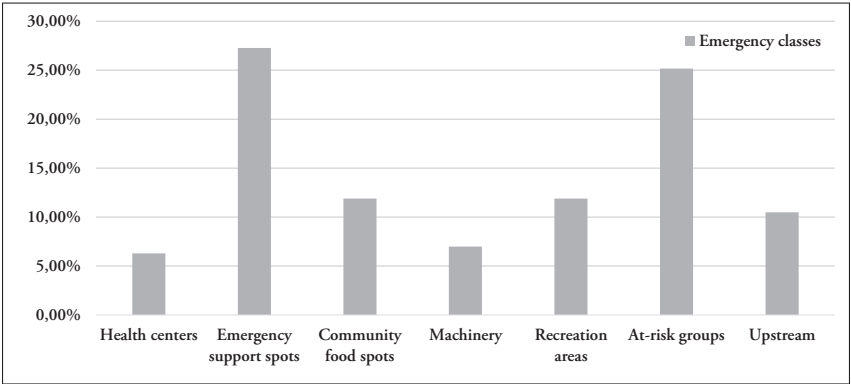


Fig. 7 - Frequency of classes of points indicated by the students.
Fig. 7 - Frequência das classes dos pontos indicados pelos alunos.

In addition, the Emergency Planning Manual of the Civil Defense State Secretariat of Rio de Janeiro (2000) provides, among its prevention activities, the preparation of maps of risks and vulnerabilities, the creation of threat maps, and education and training programs in the disaster theme addressed to organizations or the general population and, among its preparatory actions, carrying out an inventory of physical, human and financial resources, the strategic location of resources and supplies and the determination and signaling of evacuation routes and areas for temporary accommodation. Many of these objectives are contemplated in studies such as the present one and the ones mentioned above, validating the proposed methodology and showing how this type of activity can collaborate with the activities of public authorities and managers.

Conclusion

Environmental education aims to make all citizens aware that environmental problems are part of their lives and that they can only be solved with their active participation. It serves to show the environmental reality, with all its complexity and controversial aspects, strengthening the conscious and transforming side about its relationship with the environment, which helps in the critical and questioning sense about environmental issues, such as the impacts generated by climate change and the nature of socio-environmental disasters. On January 3, 2023, State Law 9,949/23 was sanctioned and that climate education must be included as a theme across school subjects, for all schools in the state of Rio de Janeiro. The law provides that the theme of climate education should be included in the State Environmental Education Program, provided for in Law 7,973/18. It will be up to the State Departments of Education and Science, Technology, and Innovation to adapt the implementation of environmental education in schools, according to the reality of each educational unit and the regional profile.

Young people are part of the community and interact with their environment in their own way. One way for them to participate socially in a meaningful way is to involve them in joint projects with adults, engaging in a more horizontal dialogue

and building the notion of collective management. The study reveals points of high vulnerability distributed throughout the neighborhood and serves as a tool to assist in urban planning and DRM, helping to raise awareness for the entire school community, especially for those directly involved in the process.

The elaboration of the risk map and the emergency map proved to be an essential action of empowerment so that the particular school group can think about the space and prevention strategies, in the event of a socio-environmental disaster, being an essential tool to insert residents in the process of DRM, as quoted by Marchezini:

“[...] when collecting memories related to environmental disasters experienced by residents of the region, we sought to identify their perceptions of risk and causal attributions to environmental disasters and promoted the interaction of residents with technical equipment” (Marchezini et al., 2017, p.116).

Observing the overlapping of risks that emerged throughout the proposed activities is greatly beneficial for understanding the perception and exposure to risk in which the participants are involved. Despite the intention to mostly map environmental risks in the surroundings of the school and the place where they live, it is necessary to understand that often the risks related to infrastructure and security, for example, will be more urgent in the population's perception and therefore may end up diminishing the importance to other risks, considered secondary. By encouraging the mapping of all these aspects, studies within the scope of this work intend to investigate the complexity of the social x political x economic x environmental system, taking their results to the knowledge and interaction with public power managers, with the potential to modify and elaborate measures of prevention and response, as well as general improvements for the community.

The objective of seeing the surroundings of the school is to seek to strengthen a culture in DRR, as it encourages participatory processes, which generate the strengthening of individual and community capacity, from the school period, seeking to see, understand, and improve the response to disasters, to demystify them. Finally, this experience intends to demonstrate that the role of the school

in the DRR is to become a space for dialogue and collective social participation, valuing different knowledge and insights to produce new learnings that contribute to the implementation of international frameworks and current legislation.

Bibliography

- Araújo, S. B. (2012). *Administração de desastres: conceitos e tecnologias*. SYGMA–SMS. Gestão de Risco. 3ª Edição.
- Araújo, V. G., Silva Filho, J. L., Junior, S. C. (2018). Metodologias participativas em escolas de campinas (sp) e áreas de entorno: uma abordagem teórico-metodológica sobre o meio ambiente. *Rev. Para Onde!?*, 10(1), 194-204.
- Acsegrad, H. (2006). Vulnerabilidade ambiental, processos e relações. *II Encontro Nacional de Produtores e Usuários de Informações Sociais. Econômicas e Territoriais*, FIBGE, Rio de Janeiro.
- Carvalho, N. L., Silva, V. E. e Coelho Netto, A. L. (2018). O sistema de alerta e alarme como estratégia de redução de riscos: participação popular e avaliação de políticas públicas. *Revista Desenvolvimento e Ambiente*, UFPR. Vol. 46.
- Coelho Netto, A. L. (1994). Hidrologia de Encosta na Interface com a Geomorfologia. In: Guerra, Antônio J.T., Cunha, Sandra B. da. *Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos*. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil.
- Coutinho, B. H. (2015). *Relatório Técnico do 2º ano Pós-Doutorado PDJ/CNPq* - Processo: 161629/2012-1 (01/12/2013 a 30/11/2014), Laboratório de Geohidroecologia - GEOHECO – IGEO – UFRJ.
- Duek, T. C. N., de Freitas, L. E., & de Mendonça, M. B. (2020). Preliminary evaluation of emergency shelters for disasters associated with landslides at the hydrographic basin of Corrego d'Antas, Nova Friburgo, Rio de Janeiro, Brazil. *Climate Change, Hazards and Adaptation Options: Handling the Impacts of a Changing Climate*, 177-195.
- Engel, G. I. (2000). *Pesquisa-ação*. Educar em Revista, 181-191.
- Falkenmark, M. & Folke, C. (2002). The ethics of socio-ecohydrological catchment management: towards hydrosolidarity. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 6, n. 1, 1-9.
- Freitas, L. E., & Coelho-Netto, A. L. (2016). Reger Córrego Dantas: uma ação coletiva para enfrentamento de ameaças naturais e redução de desastres socioambientais. *Ciência & Trópico*, 40(1).
- Freitas, L. E., Coelho-Netto, A. L. (2019). Gestão de riscos de desastres e participação popular: lições aprendidas e a relevância da educação para a consolidação da Rede de Gestão de Riscos da Bacia Hidrográfica do Córrego d'Antas (Reger-CD), Nova Friburgo/RJ. *Giramundo: Revista de Geografia do Colégio Pedro II*, 4(7), 89-101.
- Freitas, L. E., Nunes, F. S. B. (2020). Potencial de SIG participativos na Gestão de Riscos de Desastres e Emergências em Saúde. *Saúde em Debate*, 44, 214 - 229.
- Freitas, L. E., Nunes, F. S. B., Coelho Netto, A. L., Rocha, V., Leal, P., Mendonça, M. B., Schottz, S., Freitas, C. (2021). Plano de contingência de base comunitária e técnico-científico da bacia do Córrego d'Antas –Nova Friburgo/RJ. *Relatório Técnico*. Rio de Janeiro, 98p.
- Gianasi, L. M., Vieira, D. C., Pimenta, R. H. (2014). Mapeamento geo participativo: Saberes científicos e populares na estruturação de uma gestão participativa das águas. In *Congresso Brasileiro de Cartografia*. XXVI.

- Gianasi, L. M., Vieira, D. C., Pimenta, R. H. (2014). Mapeamento geo participativo: Saberes científicos e populares na estruturação de uma gestão participativa das águas. In *Congresso Brasileiro de Cartografia*. XXVI.
- Hamann, B., Lopes, M. C., Tomio, D., Vieira, R. (2019). Práticas educativas para a prevenção e mitigação aos riscos de desastres. *Expressa Extensão*, 24(3), 197-208. JIMÉNEZ-DENIS, Osmel *et al.* La educación para la percepción de riesgos de desastres como prioridad del trabajo educativo en la escuela cubana. *Revista Electrónica Educare*. Havana, v. 21, n 3, Sep/Dic 2017, 1-12.
- Jiménez-Denis, O., Villalón-Legrá, G., & Evora-Larios, O. E. (2017). La educación para la percepción de riesgos de desastres como prioridad del trabajo educativo en la escuela cubana. *Revista Electrónica Educare*, 21(3), 1-12.
- Ketele, J. M., & Roegiers, X. (1996). *Méthodologie du recueil d'informations: fondements des méthodes d'observations, de questionnaires, d'interviews et d'études de documents*. Bruxelles, Belgique: De Boeck Université.
- Kobiyama, M., Rocha, T. V., Giglio, J. N., & Mota, A. D. A. (2007). Ensino de hidrologia para prevenção de desastres naturais como projeto de extensão universitária no estado de Santa Catarina, Brasil. *XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos* (2007: São Paulo) São Paulo: ABRH, Anais.
- Matsuo, P. M., de Oliveira, S. A., Silva, R. L. F., Trajber, R. (2019). Redução de riscos de desastres na produção sobre educação ambiental: um panorama das pesquisas no Brasil. *Pesquisa em Educação Ambiental*, 14(2), 57-71.
- Marchezini, V., Iwama, A., Andrade, M. R. D. M., Trajber, R., Rocha, I., Olivato, D. (2017). Geotecnologias para prevenção de riscos de desastres: usos e potencialidades dos mapeamentos participativos. *Rev Brasileira Cartog*, 69(1), 107-128.
- Mendiondo, E. M. (2002). Bacia escola e sociedade na conservação da água urbana. São Carlos: SHS/ EESC/USP. 16 p.
- NATIONAL CIVIL DEFENSE POLICY (2007) – Ministry of National Integration, Brasília. Disponível em: <http://www.defesacivil.gov.br/publicacoes>.
- Penna, C. (2014). Paulo Freire no pensamento decolonial: um olhar pedagógico sobre a teoria pós-colonial latino-americana. *Revista de Estudos e Pesquisas sobre as Américas*, 8(2), 164-180.
- Ribeiro, R. R., Andrade, E., Brollo, M. J., Tominaga, L. K., Ribeiro, F. (2015). A redução dos riscos de desastres começa na escola: estudo de caso em Campos do Jordão (SP). In *ABGE, Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental* (Vol. 15).
- Preto, I., McCall, M. K., Freitas, M., Dourado, L. (2016). Participatory mapping of the geography of risk: Risk perceptions of children and adolescents in two Portuguese towns. *Children, Youth and Environments*, 26(1), 85-110.
- POLÍTICA NACIONAL DE DEFESA CIVIL (2007). Ministério da Integração Nacional, Brasília. Disponível em: <http://www.defesacivil.gov.br/publicacoes>.
- Santos, B. D. S. (2007b). *Para além do pensamento abissal: das linhas globais a uma ecologia de saberes*. Novos estudos CEBRAP, 71-94.
- Santos, A. C. V. S. (2007a) *Família e Escola: Uma parceria no bairro de São Geraldo*, Nova Friburgo-RJ. (Monografia de conclusão de curso). Universidade Federal de Juiz de Fora (Faculdade de Educação).
- Schmidt, L., Delicado, A., Gomes, C., Granjo P., Guerreiro, S., Horta, A., Mourato, J., Prista, P., Saraiva, T., Truninger, M., O'Riordan, T., Santos, F.D., and Penha-Lopes, G. (2013). Change in the way we live and plan the coast: stakeholders discussions on future scenarios and adaptation strategies. In: Conley, D.C., Masselink, G., Russell, P.E. and O'Hare, T.J. (Eds.), *Proceedings 12th International Coastal Symposium (Plymouth, England)*. J. Coast. Res. 65, 1033–1038 (special issue).

- Selby, M. J. (1993) *Hillslope Materials and Processes*. Oxford: 2ed. Oxford University Press, Oxford, 451 p.
- Silva, C. N., & Verbicaro, C. C. (2016). O mapeamento participativo como metodologia de análise do território. *Scientia Plena*, 12, 1-12.
- Slovic, P., Finucane, M. L., Peters, E., Macgregor, D. G. (2010). Risk as Analysis and Risk as Feelings: some thoughts about affect, reason, risk and rationality. In: P. Slovic (Org.). *The feeling risk: new perspectives on risk perception*. Earthscan, London, 21-36.
- Tavares, A. (2011), Percepção dos riscos naturais e tecnológicos, confiança institucional e preparação para situações de emergência: o caso de Portugal continental. *Revista Crítica de Ciências Sociais*, Coimbra, v. 93, p.167-193, Jun. Disponível em: <https://eg.uc.pt/handle/10316/25449>
- Thiollent, M. (2011). *Metodologia da investigação-ação*.
- Thiollent, M. (2006). *A inserção da pesquisa-ação no contexto da extensão universitária. Pesquisa participante: a partilha do saber*. Aparecida: Ideias e Letras, 151-65.
- UNISDR, C. (2015). *The human cost of natural disasters: A global perspective*.
- Veyret, Y. (2007). *Os riscos: o homem como agressor e vítima do meio ambiente*. São Paulo: Contexto, 2007.

**MAPEAMENTO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO E
METODOLOGIA PARA A DEFINIÇÃO DO
GRAU DE RISCO DE FRENTES DE LAVRA
GEOLOGICAL-GEOTECHNICAL MAPPING
AND METHODOLOGY FOR DEFINING THE
RISK GRADES OF MINING FACES**

Jehovah Nogueira Júnior

GEOCOR Consultoria e Projetos Ltd (Brasil)

Departamento de Geotecnia

ORCID: 0009-0001-0868-6962 jehovah.nogueira@geocor.com.br

Resumo: São objeto do presente trabalho, os taludes de escavação das frentes de lavra de mineração. Seu objetivo é a apresentação da metodologia proposta para a determinação do grau de risco das frentes de lavra de pedreiras de rochas granitóides situadas nos municípios de Arujá, Barueri, Caieiras, Guararema, Guaratinguetá, Santa Isabel, Santos e Pirituba, no Estado de São Paulo, Brasil, desde 2012, a partir do mapeamento geológico-geotécnico dos taludes escavados, para atendimento à Norma NRM-02 do Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) para lavra a céu aberto e com vistas a se recomendar e implementar medidas de prevenção, controle e mitigação. Foram determinados os graus de risco Baixo, Médio e Alto das frentes de lavra, a partir da caracterização e avaliação de fraturas sub-horizontais de alívio de tensões; fraturas desfavoráveis com mergulhos de 30° a 70°; fraturas subverticais; cunhas formadas por fraturas com mergulhos

desfavoráveis; falhas e zonas de cisalhamento; bolsões de solo e de rocha muito alterada, e áreas do maciço extremamente fraturadas ou fragmentadas pelo fogo de desmonte.

Palavras-chave: Mapeamento geológico-geotécnico, frentes de lavra, taludes rochosos e graus de risco.

Abstract: The focus of this work is the excavation slopes of mining faces. Its purpose is to present the proposed methodology for determining the risk grades of the mining faces of granite quarries in the municipalities of Arujá, Barueri, Caieiras, Guararema, Guaratinguetá, Santa Isabel, Santos, and Pirituba in the State of São Paulo, Brazil, since 2012. It is based on the geological-geotechnical mapping of the excavated slopes, in order to comply with the National Department of Mineral Production (DNPM) NRM-02 Standard for open pit mining and with a view to recommending and implementing prevention, control and mitigation measures. Low, Medium and High risk grades were determined for the mining faces based on the characterization and evaluation of sub-horizontal stress relief fractures; unfavourable fractures with dips from 30° to 70°; subvertical fractures; wedges formed by fractures with unfavourable dips; faults and shear zones; pockets of soil and highly altered rock; and areas of the rock massif extremely fractured or fragmented by blasting.

Keywords: Geological-geotechnical mapping, mining faces, rock slopes and risk grades.

Introdução

A metodologia proposta para a determinação do grau de risco de frentes de lavra de mineração foi desenvolvida a partir dos trabalhos de mapeamento geológico-geotécnico e análise estrutural em pedreiras no Estado de São Paulo, Brasil, situadas nos municípios de Arujá, Barueri, Caieiras, Guararema, Guaratinguetá, Santa Isabel, Santos e Pirituba (fig. 1).

Nos mapeamentos realizados, constatou-se a falta de um critério de avaliação que contemplasse, além das questões de segurança intrínsecas a cada condicionante ou parâmetro geológico-geotécnico, a sinergia entre eles, tendo sido desenvolvida uma classificação qualitativa do grau de risco de cada frente de lavra ativa ou desativada, nesse caso para fins de recuperação ambiental ou destinação da área da cava para outro uso ou ocupação.

Quanto à segurança, os taludes provisórios e definitivos de escavação de cavas de mineração podem apresentar, de modo geral, instabilidades associadas a (i) taludes de solo: inclinação e altura incompatíveis com os parâmetros geotécnicos



Fig. 1 - Localização das Pedreiras no Estado de São Paulo, Brasil.

Fig. 1 - Location of quarriers in State of São Paulo, Brazil.

de resistência do material do capeamento, presença de matacões potencialmente instáveis ou estruturas geológicas desfavoráveis preservadas e (ii) taludes de rocha: estruturas geológicas com mergulho desfavorável, alto grau de fraturamento ou de alteração, ou materiais expansivos ou desagregáveis.

A identificação, caracterização visual e avaliação desses condicionantes geológico-geotécnicos nos taludes de solo do capeamento das minas e nos taludes rochosos das frentes em exploração e daquelas já exploradas, possibilitou a definição qualitativa dos graus de risco, bem como a adoção de medidas para controle, prevenção ou mitigação necessários, com vistas a:

- Garantir que as escavações fossem realizadas de forma a se evitar ou reduzir ao máximo os riscos a pessoas e equipamentos.
- Possibilitar as adequações necessárias dos métodos de escavação e da configuração dos taludes provisórios, para se evitar ou minimizar riscos, e à configuração final dos taludes definitivos para fins de recuperação ambiental ou destinação da área da cava para outro uso ou ocupação, evitando-se ou minimizando-se inadequações que possam dificultá-la.
- Assegurar o atendimento às normas técnicas vigentes e à boa prática de Engenharia.

Mapeamento Geológico-geotécnico

Taludes de Solo

Instabilidades em taludes de solo podem ocorrer durante as fases de exploração mineral e de recuperação ambiental da área. Estão relacionadas a inclinações inadequadas; falta de proteção superficial ou sua deterioração; deficiências no sistema de drenagem superficial; processos erosivos; percolação de água, e carregamentos não previstos, manifestando-se como rupturas e escorregamentos. Podem ser identificadas e diagnosticadas pela presença de trincas na superfície do terreno, abatimentos, deslocamentos, basculamentos, degraus, presença de água e zonas saturadas (Nogueira Jr., 2014).

Os mapeamentos geológico-geotécnicos dos taludes de solo foram realizados com vistas à identificação, registro e caracterização detalhada das seguintes feições e ocorrências:

- Trincas de tração (abertas), com indicação da forma, comprimento, abertura em milímetros, erosões e deslocamentos associados;
- Trincas de cisalhamento (fechadas, com abatimento de um dos lados ao longo da superfície de ruptura), com indicação da forma, comprimento, rejeito (deslocamento vertical) em milímetros, e erosões e deslocamentos associados;
- Escorregamentos relacionados às trincas, com seus limites e altura da superfície de ruptura, seção típica transversal pela ruptura, volume aproximado do material mobilizado, tipo de material rompido e causa provável da ruptura;
- Presença de matacões, com indicação da camada de solo de ocorrência (coluvião, solo residual maduro ou jovem), forma e diâmetro médio dos blocos, imbricamento, descalçamentos, deslocamentos, presença de matéria orgânica, e erosões e escorregamentos associados;
- Presença de água e zonas saturadas, com indicação das áreas com umidade e suas formas de ocorrência, e processos erosivos associados.
- Deterioração da proteção superficial existente, com croqui das áreas das ocorrências, extensão, estado de conservação e identificação de suas causas;
- Erosões na forma de locas e tubos nos taludes, com indicação da posição da ocorrência em relação ao talude (topo, posições intermediárias e pé), dimensões, profundidade e presença de água.

Áreas rompidas ou potencialmente instáveis, e massas de materiais escorregados, foram investigadas por meio de sondagens à percussão, e as rupturas e escorregamentos mais significativos foram submetidos a análises de estabilidade com base em parâmetros geotécnicos de resistência estimados a partir da bibliografia e experiência em estudos semelhantes.

Na fot. 1, pode ser visto o capeamento de solo no topo de uma pedreira, com os taludes apresentando inclinações adequadas e uma berma intermediária, embora o recuo do pé do talude de solo em relação à crista do talude de rocha alterada não seja adequado.



Fot. 1 - Taludes de solo em capeamento de pedreira
(Fotografia de Marcelo Freitas Guimarães, tirada a 25/10/2017).

Photo 1 - Soil slopes in quarry capping
(Photography by Marcelo Freitas Guimarães taken on 25/10/2017).

Taludes Rochosos

A estabilidade dos taludes rochosos é determinada pelas características das estruturas geológicas presentes no maciço rochoso quanto ao tipo (fratura, junta, falha, dobra etc.); frequência (grau de fraturamento); atitude (direção e mergulho); abertura em milímetros; alteração das paredes; tipo de superfície (rugosa, ondulada, plana, lisa, regular ou irregular); tipo de preenchimento (oxidado, arenoso, argiloso, argilo-arenoso, pétreo etc.); extensão (persistência) e presença de água.

A direção e o mergulho das fraturas – formando planos ou cunhas desfavoráveis em relação ao plano do talude – provocam instabilidades que são agravadas pelo grau de fraturamento do maciço; diminuição do atrito nos casos de superfícies planas, lisas, ou preenchidas por material argiloso; e pela presença da água, que atua como lubrificante e/ou introduz esforços pela aplicação de cargas piezométricas mais elevadas, denominadas pressões neutras.

- Identificação e lançamento, nas fotos panorâmicas, de (i) estruturas geológicas, diferenciando-as quanto ao tipo (fratura, junta, falha, dobra etc.) e direção e mergulho obtidos por meio de bússola; (ii) cunhas formadas por fraturas potencialmente instáveis; (iii) bolsões e faixas de rocha alterada, muito fraturada e fragmentada por fogo de desmorte; e (iv) blocos em equilíbrio precário, descalçados ou na iminência de desprendimento do maciço, escorregamento ou tombamento; e
- Caracterização das fraturas e demais estruturas mapeadas quanto à (i) frequência (grau de fraturamento), (ii) abertura em milímetros, (iii) alteração das paredes, (iv) tipo de superfície (rugosa, ondulada, plana, lisa, regular ou irregular), (v) tipo de preenchimento (oxidado, arenoso, argiloso, argilo-arenoso, pético etc.), (vi) extensão (persistência) e (vii) presença de água, e eventuais outras características consideradas relevantes.

Para o mapeamento dos taludes e bancadas de difícil acesso, inacessíveis ou com risco de tombamentos, escorregamentos e quedas de blocos, foram realizadas filmagens e fotos panorâmicas, frontais e de detalhe por meio de VANT (Veículo Aéreo Não Tripulado) (fot. 2). Nas imagens obtidas, as estruturas e ocorrências foram identificadas e caracterizadas de forma indireta, com base nas informações da etapa anterior, e lançadas nas fotos panorâmicas frontais, complementando o mapeamento geológico-geotécnico de cada “domínio” em toda a sua extensão e altura.



Fot. 2 - Imagens de pedreiras obtidas por meio de VANT
(Fotografia de Marcelo Freitas Guimarães, tirada a 25/10/2017).

***Photo 2** - Images of quarries obtained using UAVs
(Photography by Marcelo Freitas Guimarães taken on 25/10/2017).*

A fig. 3 é a foto panorâmica de um talude rochoso mapeado, com os traços representativos das famílias de fraturas e outras estruturas geológicas, identificadas com números sequenciais posteriormente lançados em planilhas com suas respectivas direções, mergulhos e características, assim como em estereogramas e ábacos para as avaliações de estabilidade. O capeamento de solo e de rocha alterada também estão mapeados.



Fig. 3 - Mapeamento de talude rochoso.

Fig. 3 - Rocky slope mapping.

As características das estruturas mapeadas em cada “domínio” foram lançadas em planilhas, para sua tipificação e sistematização, e avaliadas por meio de diagramas de roseta e estereogramas, de forma a se identificar as famílias ou sistemas e sua frequência. Os planos e polos das fraturas representativas das famílias obtidas foram lançados em estereogramas, juntamente com o plano do talude da frente de lavra (fig. 4) de forma a se identificar aquelas que apresentam mergulhos desfavoráveis à estabilidade, e cuja intersecção forma cunhas teóricas potencialmente instáveis (Grohmann e Campanha, 2010; Grohmann *et al.*, 2011).

As cunhas formadas por pares de fraturas desfavoráveis com mergulhos entre 20° e 70°, e eventualmente superiores a 70°, foram consideradas potencialmente instáveis e seu Fator de Segurança (F) foi avaliado conforme a metodologia proposta por Hoek e Bray (1977), e Hoek (1972), que relaciona ângulos de atrito para diversas rochas em estado intacto, ao longo de juntas, e ao longo de juntas cisalhadas em ensaios geomecânicos prévios (ângulo de atrito residual). Na fig. 5 pode ser observada uma cunha formada pela intersecção de duas fraturas com mergulhos desfavoráveis em relação ao talude. Os números representam suas direções e mergulhos obtidos por meio de bússola CLAR.

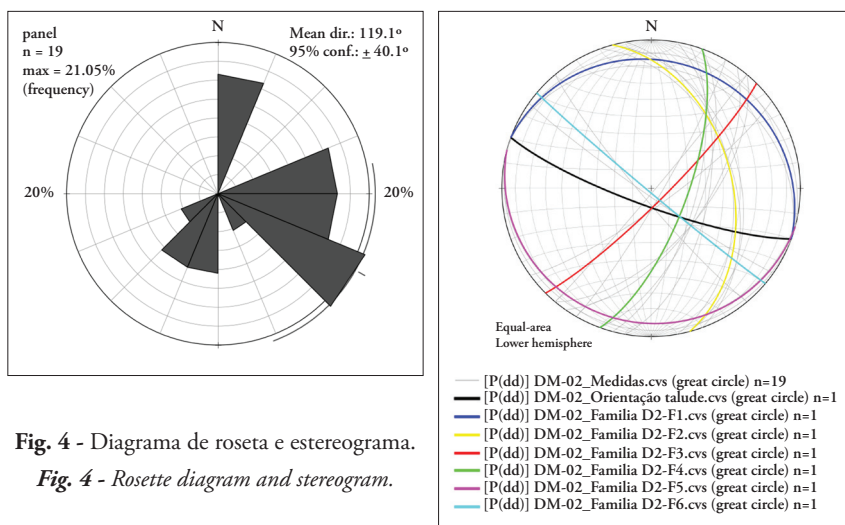


Fig. 4 - Diagrama de roseta e estereograma.

Fig. 4 - Rosette diagram and stereogram.

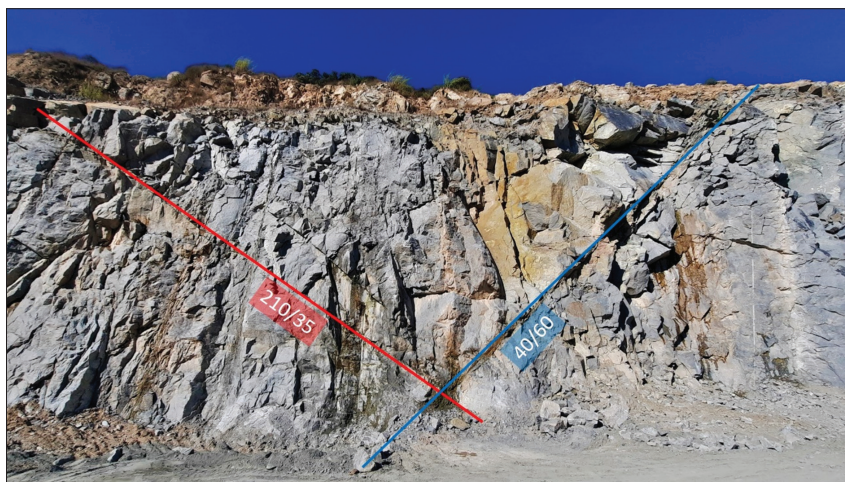


Fig. 5 - Cunha formada pela intersecção de duas fraturas.

Fig. 5 - Wedge formed by the intersection of two fractures.

A partir do mapeamento geológico-geotécnico e das avaliações realizadas, foram diagnosticadas as condições de estabilidade e o grau de risco de cada domínio, e apresentadas recomendações quanto às medidas de prevenção, monitoramento e mitigação necessárias.

Grau de Risco

Em face da exigência do DNPM no item 2.3.1 de sua Norma NRM-02 (DNPM, 2001): *1) delimitação das áreas de risco e de influência da lavra*, foi desenvolvida uma metodologia para a definição dos graus de risco de frentes de lavra, a qual vem sendo aplicada em pedreiras de rochas granitóides situadas nos municípios de Arujá, Barueri, Caieiras, Guararema, Guaratinguetá, Santa Isabel, Santos e Pirituba, no Estado de São Paulo desde 2012.

Parâmetros Geológico-geotécnicos

A definição dos graus de risco teve, como base, o mapeamento geológico-geotécnico dos trechos das frentes de lavra denominados “domínios”, a partir do qual foram avaliados os sistemas ou famílias de fraturas e suas características, e realizadas análises de estabilidade das cunhas com mergulho desfavorável. Foram, então, aplicadas pontuações aos parâmetros geológico-geotécnicos que interferem com a estabilidade e segurança dos taludes, de forma que a somatória dos pontos obtidos permitisse a determinação do grau de risco de cada “domínio”.

Foram definidos e avaliados os seguintes parâmetros geológico-geotécnicos:

- I. Capeamento
- II. Fraturas sub-horizontais de alívio de tensões no topo do talude
- III. Fraturas desfavoráveis com mergulho de 30° a 70°
- IV. Fraturas subverticais ($\geq 70^\circ$)
- V. Cunhas com mergulhos desfavoráveis
- VI. Falhas e zonas de cisalhamento
- VII. Bolsões de solo e de rocha muito alterada
- VIII. Fraturamento intenso e fragmentação do maciço

Para cada um desses parâmetros, os critérios de avaliação e as pontuações foram definidos de forma empírica e qualitativa, com base nos escorregamentos, tombamentos e situações de risco observados nos trabalhos realizados nas pedreiras, e a relação dessas ocorrências com a relevância e frequência dos condicionantes geológico-geotécnicos mapeados, e sua sinergia.

A pontuação adotada para cada condicionante, com vistas à sua classificação para a obtenção do grau de risco das frentes de lavra, é apresentada a seguir.

Capeamento (I)

O capeamento dos taludes das frentes de escavação é representado pela camada de solo de cobertura, que é removida como material estéril para permitir o avanço da lavra. Por segurança, deve ser escavado de forma que o talude do solo fique recuado em relação à crista do talude de rocha, conformando-se uma berma no topo do maciço rochoso, para que eventuais escorregamentos, materiais desagregados e blocos liberados fiquem retidos. Quanto maior o recuo, maior é a eficiência da retenção e melhores são as condições de acesso para a remoção do material solto.

A classificação deste parâmetro considerou (i) a inexistência de capeamento, (ii) a existência ou não de recuo do talude de solo, independentemente da altura e inclinação do talude, e (iii) a ocorrência de instabilidades, desagregação do solo e liberação de blocos no talude. Taludes de solo com recuo em metros inferior a 50% de sua altura foram considerados como “sem recuo”.

A presença de água não foi considerada, uma vez que o lençol freático iria se encontrar rebaixado e a saturação do solo nos eventos de chuvas é um agravante comum a todas as situações.

Por se tratar de um parâmetro que, caso desfavorável, representa grande risco para a frente de lavra, sua pontuação máxima (8) prevalece sobre a somatória de pontos obtida para o “domínio”, sendo seu grau de risco considerado Alto, independentemente da pontuação total. Na TABELA I é apresentada a pontuação adotada para esse parâmetro.

TABELA I - Pontuação para o capeamento.

TABLE I - Scoring for capping.

I – Capeamento	
Descrição	Pontuação
(I.1) Sem capeamento ou com talude de solo recuado em relação ao topo do talude rochoso	0
(I.2) Talude de solo recuado em relação ao topo do talude rochoso, com instabilidade(s) e/ou desagregação e/ou liberação de blocos	2
(I.3) Talude de solo sem recuo em relação ao topo do talude rochoso, sem instabilidade(s) e/ou desagregação e/ou liberação de blocos	4
(I.4) Talude de solo sem recuo em relação ao topo do talude rochoso, com instabilidade(s) e/ou desagregação e/ou liberação de blocos	8

Fraturas sub-horizontais de alívio de tensões no topo do talude (II)

No topo do maciço rochoso, imediatamente abaixo do capeamento de solo, é comum a ocorrência de fraturas sub-horizontais formadas pelo alívio de tensões, em decorrência do desconfinamento causado pela alteração da rocha em solo (de densidade significativamente menor) e sua remoção pelos processos erosivos. Essa redução de sobrecarga sobre o maciço provoca seu alívio e “desplacamento” para cima (fot. 3).



Fot. 3 - Fraturas de alívio de tensões em camada de rocha alterada
(Fotografia de Jehovah Nogueira Jr., tirada a 05/02/2018).

***Photo 3** - Stress relief fractures in altered rock layer
(Photography by Jehovah Nogueira Jr. taken on 05/02/2018).*

Essas fraturas quase sempre apresentam grande extensão paralelamente ao topo do maciço, e em geral são irregulares, rugosas e com espaçamento decimétrico no primeiro metro (mais crítico), aumentando com a profundidade até seu total desaparecimento. Podem promover a liberação de blocos ou deixá-los em balanço pela intersecção com outras famílias de fraturas.

Esse parâmetro é agravado pelo avanço de raízes a partir da camada de solo, as quais exercem elevadas pressões sobre as faces das fraturas provocando seu alargamento e a fragmentação do maciço, e facilitando a ação da água nos eventos de chuvas.

Sua avaliação foi baseada na ocorrência ou não de blocos soltos e/ou em balanço, independentemente da extensão dos trechos afetados e dos graus de alteração e de fraturamento da rocha. A pontuação adotada para esse parâmetro é apresentada na TABELA II.

TABELA II - Pontuação para as fraturas de alívio de tensões.

TABLE II - Scoring for stress relief fractures.

II – Fraturas Sub-horizontais de Alívio de Tensões no Topo do Talude	
Descrição	Pontuação
(II.1) Sem ocorrência	0
(II.2) Ocorrência sem blocos soltos e/ou em balanço	2
(II.3) Ocorrência com blocos soltos e/ou em balanço	4

Fraturas desfavoráveis com mergulho de 30° a 70° (III)

Todas as famílias de fraturas desfavoráveis com mergulhos entre 30° e 70° para fora do talude foram consideradas potencialmente instáveis, independentemente de sua frequência, espaçamento, extensão, características das superfícies, preenchimento, abertura, grau de alteração e presença de água (fot. 4).



Fot. 4 - Superfícies de fraturas com mergulhos desfavoráveis
(Fotografia de Jehovah Nogueira Jr., tirada a 05/02/2018).

*Photo 4 - Surfaces of fractures with unfavourable dip
(Photograph by Jehovah Nogueira Jr. taken on 05/02/2018).*

As intersecções entre famílias de fraturas desfavoráveis foram avaliadas como cunhas de mergulho desfavorável (fig. 5), com características específicas para cunhas, as quais foram analisadas individualmente quanto à estabilidade. Assim sendo, famílias de fraturas desfavoráveis que formam cunhas desfavoráveis foram avaliadas também individualmente no âmbito deste parâmetro III.

Indícios de instabilidade associados a uma família de fraturas desfavoráveis – como escorregamentos, desabamentos, deslocamentos, abatimentos, abertura de fraturas, rachaduras e trincas – foram considerados indicativos de instabilidade potencial para todas as fraturas dessa família na frente de lavra. Em tais casos, esse parâmetro recebeu a pontuação 4, independentemente do estado desta família e das demais famílias de fraturas no “domínio”, e as ocorrências de instabilidades foram mapeadas. A pontuação adotada para esse parâmetro é apresentada na TABELA III.

TABELA III - Pontuação para as fraturas com mergulho desfavorável.

TABLE III - Scoring for fractures with unfavourable dip.

III - Fraturas Desfavoráveis com Mergulho de 30° a 70°	
Descrição	Pontuação
(III.1) Sem ocorrência	0
(III.2) uma a 3 famílias	2
(III.3) > 3 famílias ou indícios de instabilidade(s)	4

Fraturas subverticais ($\geq 70^\circ$) (IV)

As instabilidades relacionadas a famílias de fraturas subverticais compreendem os tombamentos e eventuais escorregamentos nos casos de formação de cunhas com mergulho desfavorável, as quais foram objeto de avaliação específica. Portanto, o parâmetro IV se referiu somente às famílias de fraturas que pudessem se instabilizar por tombamento.

Tombamentos podem ser promovidos por pressão hidráulica, pela infiltração e retenção de água na fratura, e pelo avanço de raízes, principalmente no topo do talude. Tais fatores podem se instalar a qualquer tempo, tendo sido essas famílias consideradas potencialmente instáveis, independentemente das características das fraturas (fot. 5).



Fot. 5 - Escorregamento associado a fraturas subverticais
(Fotografia de Jehovah Nogueira Jr., tirada a 12/03/2022).

Photo 5 - Rock slide associated with subvertical fractures
(Photography by Jehovah Nogueira Jr. taken on 12/03/2022).

Os indícios de tombamento associados a uma determinada família de fraturas subverticais – como desabamentos, deslocamentos e abertura da fratura no topo – foram mapeados, e nesse caso esse parâmetro recebeu a pontuação 2. Na TABELA IV são apresentados os parâmetros adotados para as fraturas subverticais.

TABELA IV - Pontuação para as fraturas subverticais.

TABLE IV - Scoring for subvertical fractures.

IV – Fraturas Subverticais ($\geq 70^\circ$)	
Descrição	Pontuação
(IV.1) Sem ocorrência	0
(IV.2) uma a 3 famílias	1
(IV.3) > 3 famílias ou indícios de tombamento(s)	2

Cunhas com mergulho desfavorável (V)

As cunhas com mergulho desfavorável foram avaliadas a partir do Fator de Segurança (F) obtido nas análises de estabilidade, que leva em consideração os parâmetros de resistência mobilizados nos planos de escorregamento, os quais dependem das características das superfícies das fraturas e da existência e tipo de preenchimento (fig. 5).

Assim como na estabilidade dos taludes de solo, Fatores de Segurança inferiores a 1 indicam que as forças favoráveis ao escorregamento superam as forças resistentes, mesmo que não se observe qualquer indício de movimentação, e com valor 1 essas forças se encontram equilibradas. Com valor 1,5, as forças resistentes superam em 50% as forças favoráveis ao escorregamento, e com valores de F maiores as cunhas devem apresentar estabilidade gradativamente melhor, considerando-se então que sempre se manterão estáveis caso não ocorra nenhuma alteração significativa nos parâmetros de resistência.

Indícios de instabilidade associados a uma determinada cunha – como escorregamentos, desabamentos, deslocamentos, abatimentos, abertura de fraturas, rachaduras e trincas – são sugestivos de instabilidade potencial para todas as cunhas formadas pelas suas respectivas famílias de fraturas. Nesse caso, esse parâmetro recebeu a pontuação 6, independentemente do estado da cunha avaliada e das demais cunhas no domínio, sendo mapeadas as ocorrências observadas.

A pontuação dada a esse parâmetro foi atribuída à família de cunhas com o Fator de Segurança mais baixo ou que apresentou indícios de instabilidade (6), independentemente dos valores de F obtidos para as demais famílias. As pontuações adotadas para esse parâmetro são apresentadas na TABELA V.

TABELA V - Pontuação para as cunhas com mergulho desfavorável.

TABLE V - Scoring for wedges with unfavourable dip.

V – Cunhas com Mergulho Desfavorável	
Descrição	Pontuação
(V.1) Sem ocorrência ou com FS $\geq 1,5$	0
(V.2) FS 1 a 1,5	3
(V.3) FS < 1 ou indícios de instabilidade	6

Falhas e zonas cisalhadas (VI)

As falhas e zonas cisalhadas (fot. 6) podem causar escorregamentos caso apresentem preenchimento argiloso e este entre em contato com a água, ou pela interseção com famílias de fraturas. Como o contato com a água pode ocorrer a qualquer tempo, a presença de argila fez com que essas estruturas fossem consideradas potencialmente instáveis.



Fot. 6 - Zonas cisalhadas no maciço rochoso
(Fotografia de Jehovah Nogueira Jr., tirada a 11/02/2019).

Photo 6 - Sheared zones in the rock massif
(Photography by Jehovah Nogueira Jr. taken on 11/02/2019).

Os indícios de instabilidade como escorregamentos (fot. 7) ou outras movimentações, e as estruturas envolvidas, foram mapeados e as áreas do talude afetadas ou com risco de movimentações foram delimitadas.

Na ocorrência de uma ou mais falhas ou zonas cisalhadas com e sem preenchimento argiloso, a pontuação atribuída a esse parâmetro na frente de lavra contemplou a situação de maior risco (4). Na TABELA VI é apresentada a pontuação adotada para as falhas e zonas cisalhadas.

TABELA VI - Pontuação para as falhas e zonas cisalhadas.

TABLE VI - Scoring for faults and sheared zones.

VI – Falhas e Zonas Cisalhadas	
Descrição	Pontuação
(VI.1) Sem ocorrências	0
(VI.2) uma ou mais ocorrências sem preenchimento argiloso	2
(VI.3) uma ou mais ocorrências com preenchimento argiloso ou indícios de instabilidade(s)	4



Fot. 7 - Superfície de escorregamento por falha
(Fotografia de Jehovah Nogueira Jr., tirada a 11/02/2019).

Photo 7 - Fault slip surface (Photography by Jehovah Nogueira Jr. taken on 11/02/2019).

Bolsões de solo e de rocha muito alterada (VII)

Bolsões de solo e de rocha muito alterada são feições em geral não sistêmicas que podem ser encontradas no maciço rochoso (fot. 8). Considerando-se que as escavações são realizadas, praticamente, só em rocha sã ou pouco alterada, sua ocorrência é eventual e localizada, com mais frequência nos taludes superiores, devendo não ultrapassar 5% da área total da frente de lavra.



Fot. 8 - Bolsões de solo e rocha alterada no maciço rochoso
(Fotografia de Jehovah Nogueira Jr., tirada a 12/03/2022).

*Photo 8 - Soil and altered rock pockets in the rock massif
(Photography by Jehovah Nogueira Jr. taken on 12/03/2022).*

Podem ocasionar escorregamentos e/ou liberação de blocos por desagregação, lixiviação pela água ou solicitações dinâmicas (fogos de desmonte), associados ou não a descalçamentos de partes maiores do maciço que abriguem fraturas ou cunhas com mergulhos desfavoráveis. Por essa razão, as áreas imediatamente acima de bolsões de solo e de rocha muito alterada também foram inspecionadas com vistas à ocorrência de instabilidades em potencial, e mapeadas quando necessário.

As pontuações adotadas para os bolsões de solo e de rocha muito alterada são apresentadas na TABELA VII.

TABELA VII - Pontuações para os bolsões de solo e de rocha muito alterada.

TABLE VII - Scoring for highly altered soil and rock pockets.

VII – Bolsões de Solo e de Rocha Muito Alterada	
Descrição	Pontuação
(VII.1) Sem ocorrências	0
(VII.2) uma ou mais ocorrências com área total $\leq 5\%$ da área do domínio	1
(VII.3) uma ou mais ocorrências com área total $> 5\%$ da área do domínio	2

Fraturamento intenso e fragmentação do maciço (VIII)

O maciço rochoso pode apresentar áreas com rocha extremamente fraturada (11 a 20 fraturas/m), com fraturamento intenso (> 20 fraturas/m) ou fragmentada pelo fogo de desmonte. Podem estar ou não associadas a fraturas ou cunhas com mergulhos desfavoráveis, e nos casos de associação foram avaliadas separadamente em relação a esses parâmetros (fot. 9).

As ocorrências nos taludes são localizadas, não sistêmicas, e em geral não chegam a 5% da área total da frente de lavra. As instabilidades e/ou liberação de blocos associadas às mesmas podem descalçar partes maiores do maciço, tendo sido inspecionadas e mapeadas, as áreas situadas imediatamente acima destas. Para esse parâmetro, foram consideradas as pontuações apresentadas na TABELA VIII.

TABELA VIII - Pontuação para fraturamento intenso e fragmentação.

TABLE VIII - Scoring for intense fracturing and fragmentation.

VIII – Fraturamento Intenso e Fragmentação do Maciço	
Descrição	Pontuação
(VIII.1) Sem ocorrências	0
(VIII.2) uma ou mais ocorrências com área total $\leq 5\%$ da área do domínio	1
(VIII.3) uma ou mais ocorrências com área total $> 5\%$ da área do domínio	2



Fot. 9 - Maciço rochoso extremamente fraturado
(Fotografia de Marcelo Freitas Guimarães, tirada a 25/10/2017).

Photo 9 - Severely fractured rock massif
(Photography by Marcelo Freitas Guimarães taken on 25/10/2017).

Classificação do grau de risco das frentes de lava

Os graus de risco têm caráter qualitativo e relativo entre si, sendo seu objetivo apenas orientar quanto às medidas a serem adotadas para garantir as condições de estabilidade e segurança (i) dos taludes provisórios durante a escavação das frentes de lava, e (ii) dos taludes definitivos durante a escavação e a etapa de recuperação ambiental da área. Foram obtidos a partir da somatória dos pontos atribuídos para os parâmetros geológico-geotécnicos avaliados individualmente, e cada trecho ou “domínio” da frente de lava teve seu grau de risco definido conforme a TABELA IX.

TABELA IX - Graus de risco.

TABLE IX - Risk Graves.

Graus de Risco			
Nulo	Baixo	Médio	Alto
0	1 a 10	11 a 15	> 15 ou I = 8

O conceito de grau de risco “nulo” – quando a somatória dos pontos de cada parâmetro é “zero” – é aplicável somente para taludes definitivos, nos quais não serão necessárias medidas como retaludamento, contenções ou monitoramento.

Para taludes provisórios, considera-se que sempre existem riscos, mesmo que a pontuação total obtida seja “zero”, pois podem ser necessários cuidados durante as escavações e/ou seu monitoramento.

A classificação dos “domínios” quanto ao seu grau de risco se aplica à geometria e às condições deles na data do mapeamento. Poderão, portanto, sofrer alteração durante e/ou após as escavações em função de intervenções realizadas, mudanças na atitude de descontinuidades geológicas e/ou na orientação e/ou inclinação dos taludes escavados, imprevistos geológicos, problemas relacionados aos fogos de desmonte, escorregamentos ou outras ocorrências.

Matriz de Classificação

Para cada trecho ou “domínio”, a pontuação atribuída aos parâmetros geológico-geotécnicos foi lançada em uma matriz de classificação, de forma a se obter a somatória de pontos e a classificação do seu grau de risco. Nessa matriz também é possível visualizar a relevância de cada parâmetro nas condições gerais de estabilidade das frentes de lavra.

A TABELA X constitui uma matriz de classificação aplicada a um trecho ou “domínio” hipotético de uma frente de lavra com grau de risco Alto.

TABELA X - Matriz de classificação.

TABLE X - Classification matrix.

Matriz de Classificação				
Parâmetro	Pontuação (descrição)			
	1	2	3	4
I – Capeamento		2 (I.2)		
II – Fraturas sub-horizontais de alívio de tensões no topo do talude	0 (II.1)			
III – Fraturas desfavoráveis com mergulho de 30° a 70°			4 (III.3)	
IV – Fraturas subverticais ($\geq 70^\circ$)		1 (VI.2)		
V – Cunhas com mergulhos desfavoráveis			6 (V.3)	
VI – Falhas e zonas de cisalhamento		2 (VI.2)		
VII – Bolsões de solo e de rocha muito alterada	0 (VII.1)			
VIII – Fraturamento intenso e fragmentação do maciço		1 (VIII.2)		
Pontuação Total	16			
Grau de Risco	Alto			

Para cada parâmetro mapeado está apresentada a pontuação obtida e sua respectiva descrição a partir das TABELAS I a VIII. Por exemplo, o parâmetro “Capeamento” foi avaliado com a pontuação 2, que se refere à descrição I.2 (talude de solo recuado em relação ao topo do talude rochoso, com instabilidade(s) e/ou desagregação e/ou liberação de blocos), conforme a TABELA I. E da mesma forma para os demais parâmetros.

Medidas Recomendadas

Com base nos resultados obtidos no diagnóstico geológico-geotécnico e no grau de risco das frentes de lavra, foram apresentadas recomendações quanto às medidas a serem adotadas para a garantia de segurança das pessoas e equipamentos durante as escavações e após a recuperação ambiental da área. Para os taludes provisórios e definitivos de escavação, as medidas recomendadas compreenderam, de modo geral, o isolamento de áreas de risco; interrupção temporária das atividades de lavra; remoção de blocos por meio de alavanca e fogachos; adequações no plano de fogo; aumento da frequência do monitoramento; estudos para detalhamento; reavaliações; aplicação de contenções como telas, chumbadores e tirantes; pré-fissuramento; dispositivos de drenagem superficial e profunda; e adequações de projeto.

Conclusão

Em atendimento à Norma Técnica NRM-02 do Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), foi realizado o mapeamento geológico-geotécnico dos taludes temporários e definitivos de escavação de diversas pedreiras de rochas granitóides no Estado de São Paulo. Com base nos dados obtidos, foi desenvolvida uma metodologia para a classificação das frentes de lavra quanto ao seu grau de risco – aplicável a qualquer cava de mineração – a qual vem sendo utilizada desde 2012, atendendo à norma e proporcionando, às mineradoras, condições operacionais melhores e mais seguras.

Bibliografia

- DNPM – DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL (2001). Norma Técnica NRM-02 – Lavra a céu aberto. Portaria nº 237, de 18 de outubro de 2001, p.10-12, Brasília, DF.
- Grohmann, C. H. e Campanha, G. A. C. (2010). Open Stereo: open source, cross-platform software for structural geology analysis. Presented at the *AGU 2010 Fall Meeting*, San Francisco, CA.
- Grohmann, C. H., Campanha, G. A. C. e Soares Jr., A. V. (2011). Open Stereo: um programa livre e multiplataforma para análise de dados estruturais. In: *XIII Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos*, Bento Gonçalves, RS.
- Hoek, E. (1972). Estimando a estabilidade de taludes escavados em minas a céu aberto. APCA, tradução nº 4 (C. M. Nieble). (versão original publicada nos Trans. Inst. Metall. 9, seção A, outubro de 1970), 58p., São Paulo, SP.
- Hoek, E. e Bray, J. W. (1977). *Rock slope engineering*. Institute of Mining and Metallurgy, London, UK, 402 p.
- Janasi, V. A. e Ulbrich, H. H. G. J. (1992). Inventário bibliográfico de granitos do Estado de São Paulo. *Boletim do IGUSP*, Publicação Especial, n. 11, São Paulo, SP.
- Nogueira Jr., J. (2014). Recuperação de Áreas Degradadas – Soluções geotécnicas e ambientais. *E.book*. Editora NEOTRÓPICA, São Paulo, SP.

SÉRIE ESTUDOS CINDÍNICOS

Títulos Publicados:

- 1 *Incêndios em Estruturas. Aprender com o Passado;*
- 2 *Educação para a Redução dos Riscos;*
- 3 *Metodologia de Análise de Riscos através de Estudos de Casos;*
- 4 *Riscos Hidrometeorológicos;*
- 5 *Pluralidade na Diversidade de Riscos;*
- 6 *Risco Sísmico - Aprender com o Passado;*
- 7 *Territórios em Risco;*
- 8 *Resiliência ao Risco;*
- 9 *Madeira Região Resiliente. Aprender com o Passado;*
- 10 *Risco de Cheias e Risco de Inundações Fluviais. Aprender com o Passado;*
- 11 *Análise e Modelação de Risco no Ordenamento do Território;*
- 12 *Perceção e Planeamento na Redução e Gestão do Risco de Catástrofes;*
- 13 *As Paisagens dos Riscos Sociais. Educar para diminuir a Vulnerabilidade;*
- 14 *Educação para o Risco: Práticas e Projetos;*
- 15 *Riscos, Proteção Civil e Cultura de Segurança: Discursos e Práticas no Portugal Democrático;*
- 16 *Risco de Movimentos em Vertentes. Aprender com o Passado.*

Tomos em preparação:

- 17 *Riscos e Saúde: Perspectivas Globais e Respostas Locais;*
- 18 *Riscos, ambiente e proteção civil: uma perspetiva tecnológica;*
- 19 *Riscos, Água e Sociedade;*
- 20 *Geografia dos Incêndios Florestais. 50 anos de Incêndios a queimar Portugal;*
- 21 *Efeitos dos Incêndios Florestais nos Solos de Portugal;*
- 22 *Floresta, Incêndios e Educação;*
- 23 *Redução do Risco e Educação.*



António Vieira é Licenciado em Geografia e Mestre em Geografia Física pela Univ. de Coimbra e Doutor em Geografia, também pela Univ. de Coimbra. Professor Associado no Departamento de Geografia da Univ. do Minho, e diretor da Licenciatura de Proteção Civil e Gestão do Território. Investigador, como membro integrado, do Centro de Estudos de Comunicação e Sociedade da Universidade do Minho.

Membro de diversas organizações científicas, nomeadamente a Associação Portuguesa de Geógrafos (APG), a Associação Portuguesa de Geomorfólogos (APGeom), a RISCOS – Associação Portuguesa de Riscos, Prevenção e Segurança, sendo também membro da FUEGORED (Red Temática Nacional Efectos de los Incendios Forestales sobre los Suelos).

Principais tópicos de investigação: os riscos naturais, processos erosivos na sequência de incêndios florestais e medidas de mitigação, geomorfologia e património geomorfológico, e alterações do uso do solo.



Adélia Nunes é Professora Associada, com Agregação em Geografia, na Faculdade de Letras da Universidade de Coimbra, onde exerce funções de docência e investigação.

É membro integrado do Centro de Estudos de Geografia e Ordenamento do Território (CEGOT), da RISCOS (Associação Portuguesa de Riscos, Prevenção e Segurança) e do NICIF (Núcleo de Investigação Científica de Incêndios Florestais). É Presidente da Associação Portuguesa de Geógrafos e Subdiretora da Faculdade de Letras da Univ. de Coimbra.

Ingressou na carreira docente universitária em 1999. Em 2001 concluiu o Mestrado em Geografia Física e em 2007 o Doutoramento em Geografia.

Dinâmica da paisagem, riscos naturais e mistos e gestão de recursos naturais são as principais áreas de investigação, tendo publicado várias dezenas de trabalhos, onde se incluem capítulos de livros e artigos em revistas de especialidade. Desde 2008 colabora no Mestrado em Ensino de Geografia e em 2017 assumiu a Coordenação do Mestrado em Geografia Física, Ambiente e Ordenamento do Território.



Bruno Martins é Licenciado em Geografia, com especialização em Gestão dos Riscos Naturais, pela Faculdade de Letras da Universidade do Porto, e Doutoramento em Letras, especialidade Geografia (Geografia Física), pela Faculdade de Letras da Universidade de Coimbra. Docente convidado em várias Universidades (Porto, Coimbra e Lusófona do Porto) e Institutos, investigador do NICIF - Núcleo de Investigação Científica de Incêndios Florestais, da Universidade de Coimbra, do CEGOT - Centro de Estudos em Geografia e

Ordenamento do Território (Universidades de Coimbra e Porto), e Secretário-Tesoureiro da Direção da RISCOS - Associação Portuguesa de Riscos, Prevenção e Segurança.



RISCOS

ASSOCIAÇÃO PORTUGUESA
DE RISCOS, PREVENÇÃO
E SEGURANÇA



estudos
CINDÍNICOS