

RESSALVA

Atendendo a solicitação do(a) autor(a), o texto completo desse trabalho será disponibilizado no repositório a partir de 28/02/2027.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de São José dos Campos
Instituto de Ciência e Tecnologia



Ministério da Ciência,
Tecnologia e Inovações



JENNIFER FORTES CAVALCANTE RENK

**SUSCETIBILIDADE A DESLIZAMENTOS EM PROVÍNCIAS
BASÁLTICAS CONTINENTAIS USANDO ALGORITMO
RANDOM FOREST**

JENNIFER FORTES CAVALCANTE RENK

**SUSCETIBILIDADE A DESLIZAMENTOS EM PROVÍNCIAS BASÁLTICAS
CONTINENTAIS USANDO ALGORITMO RANDOM FOREST**

Dissertação apresentada ao Instituto de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista (Unesp), Campus de São José dos Campos; Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden), como parte dos requisitos para obtenção do título de MESTRA pelo Programa de Pós-Graduação em DESASTRES NATURAIS.

Área: Desastres Naturais. Linha de pesquisa: Instrumentação e análise de dados

Orientadora: Profa. Dra. Tatiana Sussel Gonçalves Mendes

São José dos Campos

2025

Instituto de Ciência e Tecnologia [internet]. Normalização de tese e dissertação [acesso em 2025]. Disponível em <http://www.ict.unesp.br/biblioteca/normalizacao>

Apresentação gráfica e normalização de acordo com as normas estabelecidas pelo Serviço de Normalização de Documentos da Seção Técnica de Referência e Atendimento ao Usuário e Documentação (STRAUD).

Renk, Jennifer Fortes Cavalcante

Suscetibilidade a deslizamento em províncias basálticas continentais usando algoritmo Random Forest. 2025. / Jennifer Fortes Cavalcante Renk. - São José dos Campos : [s.n.], 2025.
107 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Pós-graduação em Desastres Naturais - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia; Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden), São José dos Campos, 2025.

Orientador: Tatiana Sussel Gonçalves Mendes.

1. Suscetibilidade a deslizamentos. 2. Random Forest. 3. Cenários de Suscetibilidade. 4. Modelo de Generalização. 5. Modelo de Extrapolação. I. Mendes, Tatiana Sussel Gonçalves, orient. II. Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia, São José dos Campos. III. Universidade Estadual Paulista 'Júlio de Mesquita Filho' - UNESP. IV. Universidade Estadual Paulista (UNESP). V. Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden). VI. Título.

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

Esta pesquisa utiliza inteligência artificial para avaliar a suscetibilidade a deslizamentos de terra nas Províncias Basálticas Continentais do Brasil, com foco em uma bacia localizada na borda da Província Estrutural da Bacia Sedimentar do Paraná. Ao analisar cicatrizes de deslizamentos e combinar fatores condicionantes com esquemas de amostragem, o estudo desenvolve modelos de suscetibilidade e cenários que podem ser generalizados e extrapolados para outras áreas. A abordagem permite a estimativa de limiares críticos ambientais que desencadeiam o fenômeno. Além disso, oferece um framework transferível e robusto para a comparação e avaliação de riscos a deslizamentos, contribuindo para análises mais confiáveis e eficazes em outras Províncias Basálticas Continentais na América do Sul (Brasil, Uruguai, Paraguai, Argentina) e África (Angola, Namíbia), que compartilham características geomorfológicas semelhantes. O trabalho contribui para gerar dados que subsidiam o planejamento do uso do solo e o desenvolvimento de infraestrutura para a redução do risco de desastres, promovendo comunidades mais seguras e resilientes em regiões propensas a deslizamentos.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

This research employs artificial intelligence to assess landslide susceptibility in Brazil's Continental Basaltic Provinces, focusing on a basin located at the edge of the Paraná Sedimentary Basin's Structural Province. By analyzing landslide scars and integrating conditioning factors with sampling schemes, the study develops susceptibility models and scenarios that can be generalized and extrapolated to other areas. The approach enables the estimation of critical environmental thresholds that trigger the phenomenon. Furthermore, it provides a transferable and robust framework for landslide risk assessment, contributing to more reliable and effective analyses in other Continental Basalt Provinces in South America (Brazil, Uruguay, Paraguay, Argentina) and Africa (Angola, Namibia), which share similar geomorphological characteristics. This supports disaster risk reduction, land-use planning, and infrastructure development, promoting safer and more resilient communities in landslide-prone area.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Tatiana Sussel Gonçalves Mendes (Orientadora)

Universidade Estadual Paulista (Unesp)

Instituto de Ciência e Tecnologia

Campus de São José dos Campos

Rodolfo Moreda Mendes

Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden)

Geodinâmica/Geotecnia

São José dos Campos

José Luís Zêzere

Universidade de Lisboa

Instituto de Geografia e Ordenamento do Território (IGOT)

Lisboa

São José dos Campos, 28 de fevereiro de 2025.

DEDICATÓRIA

Dedico esta dissertação de mestrado primeiramente a mim, pois foi fruto de muito amor pelo tema, esforço e dedicação. E a minha mãe, Sheila Fortes Cavalcante, por nunca ter permitido que eu desistisse dos meus sonhos. Sua força, amor incondicional e incentivo constante foram as bases que me sustentaram em todos os momentos, especialmente nos mais desafiadores.

Também dedico este trabalho aos meus avós, Maria Natalina Fortes Cavalcante e Geraldo de Medeiros Cavalcante, que hoje me observam do céu. Eles foram pilares de acolhimento, cuidado e inspiração, enchendo minha vida de sonhos e princípios que carrego comigo.

AGRADECIMENTOS

De forma muito especial, direciono meu profundo agradecimento à minha querida amiga e orientadora, Tatiana Sussel Gonçalves Mendes. Seu apoio incansável, ensinamentos valiosos, correções precisas e incentivo constante foram fundamentais para a conclusão deste trabalho.

Agradeço, de coração, aos meus queridos orientadores e professores que acompanharam minha trajetória desde a graduação na Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, o estágio na Companhia de Pesquisa em Recursos Minerais - CPRM e as pesquisas no Programa de Pós-Graduação em Desastres Naturais entre ICT/UNESP e Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais - CEMADEN (Maria Náise de Oliveira Peixoto, Telma Mendes da Silva, Marcelo Eduardo Dantas, Edgar Shinzato, Silvio Jorge Coelho Simões, Márcio Roberto Magalhães de Andrade, Rodolfo Moreda Mendes, Márcio Moraes e Rogério Galante Negri).

Vocês não apenas acreditaram no meu potencial, mas também incentivaram meu pensamento crítico, me guiando para além dos limites convencionais e me ensinaram a enxergar o mundo com novos olhos para chegar até aqui.

Agradeço imensamente aos meus colegas de pós-graduação Felicia França Pereira, Tatiany Correia da Silva Santos, Harideva Marturano Egas e Melina Almeida Silva, com os quais pude trocar muito conhecimento nessa jornada de aprendizado que escolhemos caminhar com sabedoria quanto ao tema de desastres naturais. E em especial, ao Adriano Martins Junqueira pelas discussões relevantes e por ter concedido as imagens de satélite da Planet e RapidEye utilizadas nesta pesquisa.

Também agradeço à FINEP (Financiadora de Estudos e Projetos) pelo financiamento e apoio ao projeto REMADEN/REDEGEO (Carta Convite MCTI/FINEP/FNDCT 01/2016) que inspirou parte desta pesquisa.

RESUMO

RENK, Jennifer F. C. **Suscetibilidade a deslizamento em províncias basálticas continentais usando algoritmo Random Forest**. 2025. Dissertação (Mestrado em Desastres Naturais) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Ciência e Tecnologia; Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden), São José dos Campos, 2025.

Em 5 de janeiro de 2017, a bacia do Rio Mascarada (Estado do Rio Grande do Sul, Brasil), localizada nos Domínios Geomorfológicos do Planalto dos Campos Gerais e da Escarpa da Serra Geral, foi severamente impactada por deslizamentos de terra desencadeados por chuvas intensas acumuladas em um curto período. Este estudo se concentra na previsão da suscetibilidade a deslizamentos de terra nesta bacia combinando fatores condicionantes dinâmicos e estáticos em diferentes cenários. Com base nas cicatrizes de deslizamentos e nas características morfológicas desta área, o estudo explora a generalização e extrapolação de modelos de suscetibilidade para uma área adjacente com o mesmo domínio geomorfológico, situada na borda da Província Estrutural da Bacia Sedimentar do Paraná, uma província basáltica continental. O algoritmo Random Forest foi utilizado em modelos de suscetibilidade considerando a bacia e a área adjacente. Para a área adjacente, dois esquemas de amostragem (generalizado e extrapolado) de não-deslizamento foram testados. O método da Razão de Frequência permitiu reclassificar os fatores condicionantes para ambas as áreas com base nas cicatrizes de deslizamentos mapeadas na bacia e gerar limiares críticos ambientais essenciais para a calibração do modelo de suscetibilidade. O Coeficiente de Correlação Linear de Pearson e a análise ANOVA avaliaram a importância dos fatores condicionantes no modelo de suscetibilidade. Os mapas de suscetibilidade foram avaliados usando métricas estatísticas e ROC AUC com base na matriz de confusão. Entre os cenários para a bacia, o cenário dinâmico que inclui dados de uso e cobertura da terra com dados geológicos, hidrológicos e topográficos apresentou melhor desempenho. O cenário usando o modelo de extrapolação para a área do Domínios Geomorfológicos do Planalto dos Campos Gerais e da Escarpa da Serra Geral obteve maiores valores para Precisão e AUC ROC devido à maior diversidade em amostras de não deslizamento. Além disso, o modelo extrapolado para áreas de características semelhantes demonstrou alta correlação com eventos recentes (2024), indicando que o método é promissor para modelos de suscetibilidade em áreas com inventários limitados de deslizamentos considerando características geomorfológicas semelhantes.

Palavras-chave: Suscetibilidade a deslizamentos. *Random Forest*. Cenários de Suscetibilidade. Modelo de Generalização. Modelo de Extrapolação. Província Estrutural da Bacia Sedimentar do Paraná.

ABSTRACT

RENK, Jennifer F. C. *Susceptibility to Landslides in Continental Basaltic Provinces Using the Random Forest Algorithm*. 2025. Dissertation (Master's degree in Natural Disasters). São Paulo State University (Unesp), Institute of Science and Technology; National Center for Monitoring and Early Warning of Natural Disasters (Cemaden), São José dos Campos, 2025.

On January 5, 2017, the Mascarada River basin (State of Rio Grande do Sul, Brazil), located in the Geomorphological Domains of the Campos Gerais Plateau and the Serra Geral Escarpment, was severely impacted by landslides triggered by intense rainfall accumulated over a short period. This study focuses on predicting landslide susceptibility in this basin by combining dynamic and static conditioning factors in different scenarios. Based on the landslide scars and morphological characteristics of this area, the study explores the generalization and extrapolation of susceptibility models to an adjacent area with the same geomorphological domain, located at the edge of the Structural Province of the Paraná Sedimentary Basin, a continental basaltic province. The Random Forest algorithm was used in susceptibility models with different sampling schemes considering the basin and the adjacent area. The Frequency Ratio method allowed reclassifying the conditioning factors for both areas based on the landslide scars mapped in the basin and generating critical environmental thresholds essential for the calibration of the susceptibility model. Pearson's Linear Correlation Coefficient and ANOVA analysis assessed the variable importance in the susceptibility model. Susceptibility maps were evaluated using statistics metrics and ROC AUC based on the confusion matrix. Among the scenarios for the basin, the dynamic scenario that includes land use and land cover data with geological, hydrological, and topographic data presents better performance. The scenario using the extrapolation model for the area of the Geomorphological Domains of the Campos Gerais Plateau and the Serra Geral Escarpment obtained higher values for Precision and AUC ROC due to the greater diversity in non-landslides samples. Furthermore, the model extrapolated to areas with similar characteristics demonstrated a high correlation with recent events (2024), indicating that the method holds promise for susceptibility models in areas with limited landslide inventories considering similar geomorphological characteristics.

Keywords: Landslide Susceptibility. Random Forest. Susceptibility Scenarios. Generalization model. Extrapolation model. Paraná Sedimentary Basin's Structural Province.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ciclo de Gestão de Risco de Desastres.	22
Figura 2 – Processo indicado para a geração de cenários de risco regional.	25
Figura 3 – Áreas de estudo: (a) Brasil no contexto das províncias estruturais, com destaque para a Província Estrutural da Bacia Sedimentar do Paraná, Estado do Rio Grande do Sul; (b) Bacia hidrográfica do Rio Mascaradas localizada nos domínios geomorfológicos do Planalto dos Campos Gerais e Escarpa da Serra Geral; e Bacia do Rio Mascarada (destacado em azul).	32
Figura 4 – Cicatrizes de deslizamento e inundação na bacia hidrográfica do rio Mascarada.	32
Figura 5 – Derrames basálticos na África correspondentes a Província Magmática Etendeka (PME) e na América do Sul a Província Magmática do Paraná (PMP).	33
Figura 6 - Produtos do radar meteorológico Morro da Igreja (DTCEA/INPE) demonstrando a evolução do sistema convectivo ocorrido em 05 de janeiro de 2017 na região das Serras Gaúcha sudeste da América do Sul (horário GMT). A escala de cores indica o volume de chuva acumuladas a cada hora	35
Figura 7 – Produto de imagem de radar meteorológico em 05 janeiro de 2017, com volume acumulado de chuva nas 8 horas do evento a partir das 15h00 (horário GMT).	36
Figura 8 – Fluxograma do método proposto.	39
Figura 9 – Área de interesse demonstrando as cicatrizes e os depósitos sedimentares no inventário realizado.	41
Figura 10 – Esquemas de amostragem para treinamento e validação: (a) Amostras de deslizamento e não-deslizamento para o modelo de suscetibilidade na bacia do Rio Mascarada; (b) Amostras de deslizamento e não-deslizamento concentradas apenas na bacia do Rio Mascarada para o modelo de suscetibilidade por generalização; (c) Amostras de deslizamento na bacia do Rio Mascarada e amostras de não-deslizamento obtidas aleatoriamente em toda a área do Domínio Geomorfológico adjacente para o modelo de suscetibilidade por extrapolação.	43
Figura 11 – Pilha de dados <i>raster</i> produzida para gerar os cenários de suscetibilidade na bacia hidrográfica do Rio Mascarada.	48
Figura 12 – Mapas de fatores condicionantes conforme as classes estabelecidas para determinar os limiares críticos ambientais na bacia hidrográfica do Rio Mascarada.	49
Figura 13 – Pilha de dados <i>raster</i> produzida para gerar cenário de suscetibilidade a deslizamento nos Domínios Geomorfológicos do Planalto dos Campos Gerais e Escarpa da Serra Geral.	50
Figura 14 – Mapas de fatores condicionantes dos Domínios Geomorfológicos do Planalto dos Campos Gerais e Escarpa da Serra Geral conforme as classes estabelecidas para determinar os limiares críticos ambientais na bacia hidrográfica do Rio Mascarada.	51
Figura 15 – Cenário de suscetibilidade de deslizamento considerando o evento extremo meteorológico na bacia do Rio Mascarada (Cenário I – Dinâmico).	70
Figura 16 – Cenário de vulnerabilidade a deslizamento ou potencialidade local a deslizamento na bacia do Rio Mascarada (Cenário II – Dinâmico).	72
Figura 17 - Suscetibilidade natural a deslizamento na bacia hidrográfica do Rio Mascarada (Cenário III – Estático).	75

Figura 18 – Mapas de suscetibilidade a deslizamento com base em fatores condicionantes topográficos e hidrológicos na bacia hidrográfica do Rio Mascarada (Cenário IV – Estático). 77

Figura 19 – Mapas de suscetibilidade natural a deslizamento nos Domínios Geomorfológicos do Planalto dos Campos Gerais e Escarpa da Serra Geral com base em amostras generalizadas a partir da bacia hidrografia do Rio Mascarada e os fatores condicionantes hidrológicos e topográficos (Cenário A – Estático). 80

Figura 20 – Mapas de suscetibilidade natural dos Domínios Geomorfológicos do Planalto dos Campos Gerais e Escarpa da Serra Geral com base em amostras extrapoladas a partir da bacia hidrografia do Rio Mascarada e os fatores condicionantes hidrológicos e topográficos (Cenário B - Estático). 83

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Valores de chuvas acumuladas nas estações pluviométricas do CEMADEN/MCTI até 30 dias (720 h) antes do evento.	34
Gráfico 2 – Pluviograma estimado com base no radar e pluviômetros na área dos deslizamentos durante o evento de chuva convectiva para cálculo do volume efetivo no epicentro dos deslizamentos.	37
Gráfico 3 – Pesos das classes segundo o método FR para caracterizar os limiares críticos ambientais na bacia hidrográfica do Rio Mascarada.	53
Gráfico 4 – Gráficos representando o Coeficiente de Correlação Linear de Pearson (ρ) entre os fatores condicionantes e o coeficiente de determinação R^2 .	65
Gráfico 5 – Método de seleção de atributos ANOVA para gerar o modelo de cenários de suscetibilidade a deslizamento na bacia hidrográfica do Rio Mascarada.	66
Gráfico 6 – Método de seleção de atributos ANOVA para gerar o modelo nos Domínios Geomorfológicos do Planalto dos Campos Gerais e Escarpa da Serra Geral referente ao Cenário A - Estático: Modelo Generalizado de suscetibilidade a deslizamento.	67
Gráfico 7 – Método de seleção de atributos ANOVA para gerar o modelo nos Domínios Geomorfológicos do Planalto dos Campos Gerais e Escarpa da Serra Geral referente ao Cenário B - Estático: Modelo Extrapolado de suscetibilidade a deslizamento.	68
Gráfico 8 - Curva ROC AUC do modelo de suscetibilidade do Cenário I - Dinâmico: (a) para o treinamento do modelo e (b) para a validação do modelo.	71
Gráfico 9 – OOB (Cenário I - Dinâmico)	71
Gráfico 10 - Curva ROC AUC do modelo de suscetibilidade do Cenário II - Dinâmico: (a) para o treinamento do modelo e (b) para a validação do modelo.	73
Gráfico 11 – OOB (Cenário II - Dinâmico)	74
Gráfico 12 - Curva ROC AUC do modelo de suscetibilidade natural do Cenário III - Estático: (a) para o treinamento do modelo e (b) para a validação do modelo.	76
Gráfico 13 - OOB (Cenário III - Estático)	76
Gráfico 14 - Curva ROC AUC do modelo de suscetibilidade do Cenário IV - Estático: (a) para o treinamento do modelo e (b) para a validação do modelo.	78
Gráfico 15 - OOB (Cenário IV – Estático)	79
Gráfico 16 - Curva ROC AUC do modelo de suscetibilidade do Cenário A - Estático: (a) para o treinamento do modelo e (b) para a validação do modelo.	81
Gráfico 17 - OOB (Cenário A - Estático)	82
Gráfico 18 - Curva ROC AUC do modelo de suscetibilidade do Cenário B - Estático: (a) para o treinamento do modelo e (b) para a validação do modelo.	84
Gráfico 19 - OOB (Cenário B - Estático)	84
Gráfico 20 - Classes de suscetibilidade de deslizamentos dos cenários I a IV, segundo a proporção de pixel, para a bacia hidrográfica do Rio Mascarada.	88

Gráfico 21 - Classes de suscetibilidade a deslizamentos dos cenários Generalizado e Extrapolado, segundo a proporção de pixel, para os Domínios Geomorfológicos do Planalto dos Campos Gerais e Escarpa da Serra Geral. 89

Gráfico 22 - Pontos de ruptura de deslizamentos ocorridos em abril/maio de 2024 coincidentes com as classes de suscetibilidade dos cenários Generalizado e Extrapolado para os Domínios Geomorfológicos do Planalto dos Campos Gerais e Escarpa da Serra Geral. 90

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Principais definições de termos associados à ciência dos desastres. 20

Quadro 2 – Caracterização dos fatores condicionantes utilizados segundo a sua tipologia e breve descrição de como será obtido, bem como sua importância no modelo de suscetibilidade a deslizamento. 44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Volume total de precipitação nas estações pluviométricas na área de interesse.	34
Tabela 2 – Avaliação de desempenho geral dos modelos de suscetibilidade a deslizamento.	87

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CEMADEN	Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais
CPRM	Companhia de Pesquisa em Recursos Minerais, Serviço Geológico do Brasil
DTCEA	Morro da Igreja Divisão de Tecnologias e Ciências Espaciais e Ambientais
FR	<i>Frequency Ratio</i>
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
MCTI	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações
MDE	Modelo Digital de Elevação
S2ID	Sistema Integrado de Informações sobre Desastres

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1 Eventos extremos e desastres	20
2.2 Movimentos de massas e seus condicionantes	22
2.3 Cenários de risco e suscetibilidade a deslizamentos: Uma abordagem espacial	23
2.4 O conceito de domínio geomorfológico	25
3 PROPOSTA DE PESQUISA	27
3.1 Hipótese	27
3.2. Objetivo	28
4 MATERIAIS E MÉTODO	29
4.1 Área de interesse e dados disponíveis	29
4.2 Método	39
4.2.1 Inventário de cicatrizes e conjunto de amostras para treinamento e validação do modelo de suscetibilidade	40
4.2.2 Geração dos fatores condicionantes	43
4.2.3 Análise de Frequência Relativa e limiares críticos ambientais para a bacia hidrográfica do Rio Mascarada.	51
4.2.4 Análise de influência dos fatores condicionantes pelo método de Correlação de Pearson na bacia hidrográfica do rio Mascarada	55
4.2.5 Seleção de atributos pelo método ANOVA e o conjunto de amostras	56
4.2.6 Aplicação do algoritmo Random Forest para modelagem de suscetibilidade a deslizamento	57
4.2.7 Avaliação de desempenho dos modelos de suscetibilidade	58
4.2.8 Cenários de suscetibilidade a deslizamentos na bacia hidrográfica do Rio Mascarada	61
4.2.9 Suscetibilidade a deslizamentos nos domínios geomorfológicos do Planalto dos Campos Gerais e Escarpa da Serra Geral	62
5 RESULTADOS	63
5.1 Limiares críticos ambientais a partir dos deslizamentos ocorridos na bacia hidrográfica do Rio Mascarada	63

5.2 Análise do Coeficiente de Correlação Linear de Pearson dos fatores condicionantes para a bacia hidrográfica do Rio Mascarada	64
5.3 Análise ANOVA F-test para a seleção de fatores condicionantes	66
5.4 Cenários de suscetibilidade a deslizamento na bacia hidrográfica do Rio Mascarada	68
5.4.1 Cenário I - Dinâmico: Cenário de suscetibilidade de deslizamento para o acumulado de chuva na bacia hidrográfica do Rio Mascarada	69
5.4.2 Cenário II - Dinâmico: Cenário de vulnerabilidade a deslizamento ou potencialidade local a deslizamento na bacia hidrográfica do Rio Mascarada	72
5.4.3 Cenário III - Estático: Cenário de suscetibilidade natural a deslizamento com fatores condicionantes dos tipos Geológico, Geomorfológico, Hidrológico e Topográfico	74
5.4.4 Cenário IV - Estático: Cenário de suscetibilidade a deslizamento com fatores condicionantes dos tipos Hidrológico e Topográfico	77
5.5 Modelo de suscetibilidade a deslizamento nos Domínios Geomorfológicos do Planalto dos Campos Gerais e Escarpa da Serra Geral	79
5.5.1 Cenário A - Estático: Modelo Generalizado de suscetibilidade a deslizamento	79
5.5.2 Cenário B - Estático: Modelo Extrapolado de suscetibilidade a deslizamento	82
6 DISCUSSÕES	85
7 CONSIDERAÇÕES E TRABALHOS FUTUROS	92
REFERÊNCIAS	95
APÊNDICE A	105

1 INTRODUÇÃO

Os movimentos de massa estão reunidos em um grande grupo de processos naturais que se caracterizam por movimentos coletivos ou individuais de materiais geológicos diversos, tais como gelos, sedimentos, solos residuais, colúvios e rochas, em variadas composições físicas, químicas e mineralógicas, que por forças geomorfológicas modelam o relevo terrestre.

Os deslizamentos são fenômenos derivados de processos geológicos e geomorfológicos que ocorrem quando a força dos materiais excede a resistência da força de cisalhamento do solo (Lin *et al.*, 2017) devido a fenômenos extremos que podem ser de origem meteorológica, hidrológica ou tectônico.

De todos os perigos naturais que ocorrem no mundo quanto a danos materiais, os desastres associados aos deslizamentos estão em sétimo lugar e as enxurradas, que podem ocorrer como consequência de eventos de deslizamentos intensos, estão em quarto lugar conforme a base de dados Sistema de Informação de Desastres (S2ID) considerando o período de 2013 a 2022 (S2ID, 2024).

Segundo Hungr *et al.* (2014), deslizamentos planares rasos são frequentemente desencadeados por chuvas extremas e estão relacionados, em particular, a solos residuais saprolíticos e lateríticos que formam uma camada mais fraca que o material subjacente. Em encostas íngremes, essa camada é capaz de persistir depositada em virtude da cimentação formada por poro pressão negativa devido à insaturação incompleta ou reforço da raiz da vegetação, mas pode ser destruída pelo avanço descendente de uma frente de molhamento e, como consequência, deflagrar o deslizamento do tipo planar raso com alto potencial para desencadear corridas de detritos ou enxurradas.

Embora existam registros de fluxos de massa no mundo, o mapeamento de áreas de risco relacionados a eventos de deslizamento rasos são fundamentais para uma gestão integrada de desastres (GIDES, 2017). Esses eventos têm alto potencial de magnitude, especialmente quando combinados com solos plásticos que favorecem deslizamentos planares rasos, generalizados e simultâneos em vales encaixados que podem gerar fluxos de detritos (*debris flow*). Nesse contexto, as cartas de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa são cruciais para o planejamento urbano e territorial, além de auxiliar na tomada de decisões durante eventos climáticos extremos que ameaçam vidas humanas e causam danos à infraestrutura e à economia (Bitar, 2014).

Vários modelos têm sido utilizados para mapear, modelar, quantificar e identificar áreas suscetíveis a deslizamento, os quais variam de simples conhecimento especializado, a sofisticados procedimentos matemáticos (Tien Bui *et al.*, 2016) e a maioria das técnicas baseia-se no uso de registros anteriores, por meio de inventários de cicatrizes de deslizamento. Os modelos de suscetibilidade com abordagens estatísticas visam analisar a distribuição espacial de deslizamentos de terra passados e que podem indicar a probabilidade de novas áreas de deslizamentos sob condições semelhantes (Abdulwahid; Pradhan, 2017; Reichenbach *et al.*, 2018; Huang *et al.*, 2020; Segue *et al.*, 2024; Moghimi *et al.*, 2024; Poddar; Roy, 2024). Esses inventários podem ser gerados manualmente por reconhecimento em campo e vetorização a partir de imagens de satélite (Uehara *et al.*, 2022) ou a partir de técnicas de sensoriamento remoto para a detecção automática de cicatrizes em imagens (Ghorbanzadeh *et al.*, 2022).

Para a modelagem da suscetibilidade a deslizamentos, é essencial reunir os fatores condicionantes locais e os limiares críticos ambientais que determinam a ocorrência de deslizamentos para produzir variáveis explicativas (Tien Bui *et al.*, 2016). Os fatores condicionantes podem ser classificados como dinâmicos ou estáticos, dependendo da duração, frequência de aquisição e processamento dos dados a serem integrados nos modelos, e podem ser gerados a partir de dados hidrológicos, geológicos e topográficos.

Algumas pesquisas ainda consideram outras características, como atividades humanas (Chen *et al.*, 2018), clima, dados oriundos de radar meteorológico, condições de permeabilidade do solo, suscetibilidade a terremotos (Moghimi *et al.*, 2024), assim como índices de vegetação ou mapa de uso e cobertura da terra, de modo a formar um conjunto de variáveis explicativas que possibilitam a geração de cenários probabilísticos de suscetibilidade a deslizamento (Poddar; Roy, 2024).

Além dos modelos estatísticos, técnicas de aprendizado de máquina com menores restrições estatísticas têm sido aplicadas para o mapeamento de suscetibilidade a deslizamentos. Dentre eles, o algoritmo de Floresta Aleatória (*Random Forest*) tem recebido destaque nos últimos anos e trabalhos recentes conseguiram demonstrar resultados robustos (Catani *et al.*, 2013; Park; Kim, 2019; Chen *et al.*, 2020; Dang *et al.*, 2020; Sahin *et al.*, 2020; Zhou *et al.*, 2021 e Moghimi *et al.*, 2024).

Considerando a capacidade do algoritmo Random Forest de lidar com grandes volumes de dados, complexos e não lineares, e não exigir maiores ajuste de hiperparâmetros quando comparados com outros métodos como Redes Neurais Artificiais

(*Artificial Neural Network*) e Máquinas de Vetores de Suporte (*Support Vector Machine*) (Taalab *et al.*, 2018), esse trabalho tem como principal objetivo o mapeamento da suscetibilidade a deslizamento em uma área de província basáltica continental usando o algoritmo *Random Forest*. Baseado no inventário de deslizamentos ocorridos em 2017 na bacia hidrográfica do Rio Mascarada (Estado do Rio Grande do Sul, Brasil) devido a um evento extremo precipitação, cenários dinâmicos e estáticos de suscetibilidade foram gerados para essa bacia e o modelo de suscetibilidade foi generalizado e extrapolado para um domínio geomorfológico adjacente, no caso, a borda da Província Estrutural da Bacia Sedimentar do Paraná, por meio dos limiares críticos ambientais estimados com base em fatores condicionantes locais e o inventário de cicatrizes. As áreas se encontram em unidades geológicas de antigos derrames basálticos em sequências sedimentares Paleozóico e Mesozóico espessas, com características geomorfológicas bastante propícias a deslizamentos.

Em estudos de suscetibilidade a deslizamentos, há uma carência de pesquisas que avaliam a influência das áreas amostrais na capacidade de generalização e extrapolação de modelos preditivos (Gameiro *et al.*, 2020). Assim, este estudo também examina como o algoritmo *Random Forest* pode generalizar e extrapolar modelos de suscetibilidade a deslizamentos usando diferentes esquemas de amostragem. A hipótese é que o modelo treinado pode mapear áreas de suscetibilidade a deslizamentos na bacia e os dados usados para treinar o modelo podem ser aplicados em outras áreas com as mesmas características geomorfológicas.

7 CONSIDERAÇÕES E TRABALHOS FUTUROS

O evento de deslizamento de terra, ocorrido em 2017 na bacia hidrográfica do Rio Mascarada, foi investigado com base em 15 fatores condicionantes do tipo meteorológico, antrópico, geológico, geomorfológico, hidrológico e topográfico, utilizando o método de FR para a definição de pesos para cada intervalo de classes dos fatores condicionantes e determinação dos limiares críticos ambientais.

Os fatores condicionantes de deslizamentos e limiares críticos ambientais derivados da do método de FR puderam ser testados como fatores de calibração de modelos de suscetibilidade em Províncias Basálticas Continentais localizadas na região Sul do Brasil e apresentou potencial para ser usado em outros afloramentos de Províncias Basálticas.

Análises estatísticas de correlação linear de Pearson e ANOVA também foram realizadas para identificar os fatores condicionantes mais correlacionados com os deslizamentos deflagrados neste evento na bacia hidrográfica do Rio Mascaradas.

Modelos de suscetibilidade a deslizamento baseados em *Random Forest* foram gerados para a bacia hidrográfica do Rio Mascarada considerando diferentes cenários em relação à tipologia dos fatores condicionantes. Os modelos de suscetibilidade também foram generalizados e extrapolados para uma área maior com as mesmas características morfoestruturais, o Domínios Geomorfológicos do Planalto dos Campos Gerais e Escarpa da Serra Geral, usando duas diferentes formas de amostragem dos pontos de não-deslizamento.

Os resultados mostraram que para a bacia hidrográfica do Rio Mascarada, o cenário que envolve os fatores condicionantes uso e cobertura da terra e fatores geológico, hidrológico e topográfico (Cenário II – Dinâmico) apresentando melhor resultado quanto à distribuição das classes de alta e muito alta suscetibilidade, bem como em relação às métricas usadas para avaliar a performance do modelo.

A partir dos resultados dos modelos generalizados e extrapolados para a área de Domínios Geomorfológicos do Planalto dos Campos Gerais e Escarpa da Serra Geral, verificou-se que as áreas amostrais afetam diretamente o resultado da modelagem de suscetibilidade, sendo que o Cenário B – Estático com distribuição de amostras extrapoladas de pontos de não-deslizamento em toda a área de interesse foi o que apresentou melhor resultado, com altos valores para a *Accuracy* e AUC ROC e baixos valores da taxa de erro. Uma maior diversidade e aleatoriedade das amostras de não-

deslizamento pode ter contribuído para esse resultado. Assim, os resultados obtidos com o modelo de extrapolação indicaram que o método proposto tem potencial para a categorização das áreas de suscetibilidade em áreas de mesmo domínio geomorfológico que os dados do inventário de deslizamentos, mesmo eles não abrangendo toda a área de análise. Portanto, quanto mais amostras de deslizamento, melhor será a calibração de um modelo de suscetibilidade.

Os resultados demonstraram bom ajuste para modelagem de cenários de suscetibilidade a deslizamento do tipo raso. No entanto, para gerar um modelo similar incluindo os fluxos de detritos (*debris flow*), conforme afirma Zanandrea *et al.* (2019), ainda é necessário testar o grau de conectividade da paisagem em relação às cicatrizes e a conectividade fluvial dos depósitos gerados, de modo a estimar a curva de contribuição e transferência de sedimentos em bacias hidrográficas montanhosas.

Além disso, a contribuição para metodologias de ajustes de cenários de suscetibilidade a deslizamento é importante para dar subsídios aos sistemas de alerta com análises preditivas mais automáticas, considerando dados meteorológicos e antrópicos como a entrada dos modelos.

O uso de bacias hidrográficas como unidade de análise dos eventos nesse contexto, traz a luz a possibilidade de gerar estimativas precisas quantos aos pesos ponderados de ajuste e calibração dos modelos segundo os limiares críticos ambientais analisados. Análises como essa, contribuem para a validação regional de pesos estimados e possibilidade de aplicação de modelos extrapolados e testes amostrais que possam contribuir para o melhoramento dos modelos em seus níveis estáticos e dinâmicos em sistemas de monitoramento e alerta de desastres.

Os modelos de suscetibilidades generalizado e extrapolado para os Domínios Geomorfológicos do Planalto dos Campos Gerais e Escarpa da Serra Geral foram avaliados com dados de eventos mais recentes de deslizamentos nessa região, abril a maio de 2024, demonstrando alta correlação, principalmente no modelo de suscetibilidade extrapolado. Da mesma forma, novos deslizamentos podem ser usados para melhorar a calibração de modelos de suscetibilidade.

Portanto, os condicionantes e limiares críticos ambientais derivados do método FR podem ser valiosos para testar modelos em outras Províncias Basálticas Continentais na América do Sul (Brasil, Uruguai, Paraguai e Argentina) e na África (Angola e Namíbia). O método tende a ser promissor para ajustar modelos em áreas com inventários limitados.

No entanto, validações regionais e novas calibrações são essenciais para garantir sua aplicabilidade e precisão em diferentes contextos geológicos e climáticos.

REFERÊNCIAS

ABDULWAHID, W.M.; PRADHAN, B. Landslide vulnerability and risk assessment for multi-hazard scenarios using airborne laser scanning data (LiDAR). **Landslides**, v. 14, p. 1057-1076, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s10346-016-0744-0> .

AFRICA GEOPORTAL. *Litologia Superficial da África*, 2009. Disponível em: <https://africageoportale.maps.arcgis.com/home/item.html?id=34ca8e39933e4725b9a68f538aba565>. CITAR NA FIGURA DOS DERRAMES BASALTICOS

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; DE MORAES GONÇALVES, J. L.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>.

AVELAR, A. S.; NETTO, A. L. C. Fraturas e Desenvolvimento de Unidades Geomorfológicas Côncavas no Médio Vale do Rio Paraíba do Sul. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 22, n. 2, p. 222-227, 1992. DOI: <http://dx.doi.org/10.25249/0375-7536.1992222227>.

AZARAFZA, M.; AZARAFZA, M.; AKGÜN, H. *et al.* Deep learning-based landslide susceptibility mapping. **Scientific Reports**, v. 11, n. 1, p. 1–16, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-03585-1> .

BANNARI, A.; GHADEER, A.; EL-BATTAY, A.; HAMEED, N.; ROUAI, M. Detection of Areas Associated with Flash Floods and Erosion Caused by Rainfall Storm Using Topographic Attributes, Hydrologic Indices, and GIS. **Global Changes and Natural Disaster Management: Geo-Information Technologies**, p. 155–174, 2017. DOI: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-51844-2_13.

BEVEN, K. J.; KIRKBY, M. J. A Physically Based, Variable Contributing Area Model of Basin Hydrology. Un modèle à base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin versant. **Hydrological Sciences Bulletin**, v. 24, p. 43-69, 1979. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/02626667909491834>.

BITAR, Omar Yazbek (Coord.). *Cartas de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundações: 1:25.000 (livro eletrônico)*. São Paulo: IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo; Brasília, DF: CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 2014. (Publicação IPT; 3016). Disponível em: https://rigeo.sgb.gov.br/bitstream/doc/16588/1/NT-Carta_Suscetibilidade.pdf. Acesso em: 21 dez. 2024.

BRASIL. Ministério da Integração Nacional. Instrução Normativa n. 1, de 24 de agosto de 2012b. **Diário Oficial da União**. Seção 1, n. 169, quinta-feira, 30 de agosto de 2012 (b). Disponível em: <https://bibliotecadigital.economia.gov.br/handle/123456789/208>.

BRASIL. Lei nº 12.608, de 10 de abril de 2012. **Institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil - PNPDEC**; dispõe sobre o Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil - SINPDEC e o Conselho Nacional de Proteção e Defesa Civil - CONPDEC; autoriza a criação de sistema de informações e monitoramento de desastres; altera as Leis nos 12.340, de 1º de dezembro de 2010, 10.257, de 10 de julho de 2001, 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.239, de 4 de outubro de 1991, e 9.394, de 20 de dezembro de 1996; e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, 11 abr. 2012. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12608.htm.

BREIMAN, L. Random Forest. **Machine Learning**, v. 45, n. 1, p. 5–32, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>.

BUMA, J.; VAN ASCH, T. Slide (rotational). DIKAU, R., BRUNSDEN, D., SCHROTT, L., IBSEN. ML (eds.), *Landslide Recognition, Identification, Movement and Causes*: Gran Bretaña, **John Wiley and Sons**, p. 42-61, 1996. ISBN: 978-0-471-96477-3.

BURROUGH, P. A.; McDONNELL, R. A. *Principles of Geographical Information Systems*. Oxford, **Oxford University Press**, 1998. ISBN: 9780198742845.

CATANI, F.; LAGOMARSINO, D.; SEGONI, S.; TOFANI, V. Landslide susceptibility estimation by random forest technique: sensitivity and scaling issues. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 13, n. 11, p. 2815–2831, 2013. DOI: <https://doi.org/10.5194/nhess-13-2815-2013>.

CENTRO NACIONAL DE MONITORAMENTO E ALERTA DE DESASTRES NATURAIS - CEMADEN/MCTI. **Ameaças naturais, movimento de massa**. Disponível em: <https://www.gov.br/cemaden/pt-br/paginas/ameacas-naturais/movimento-de-massa>.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS – CPRM. *Geologia da Bacia do Paraná em 1:1.000.000*, 2022. Disponível em: https://rigeo.sgb.gov.br/bitstream/doc/23037/5/sig_geologia_da_bacia_do_parana_vr1.zip.

CHEN, W.; XIE, X.; WANG, J. *et al.* A comparative study of logistic model tree, Random Forest, and classification and regression tree models for spatial prediction of landslide susceptibility. **Catena**, v. 151, p.147–160, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.11.032>.

CHEN, W.; PENG, J.; HONG, H.; SHAHABI, H.; PRADHAN, B.; LIU, J.; ZHU, A.-X.; PEI, X.; DUAN, Z. Landslide susceptibility modelling using GIS based machine learning techniques for Chongren county, Jiangxi province, China. **Science of the Total Environment**, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.124>.

CHEN, T.; ZHU, L.; NIU, R.; TRINDER, C. J.; PENG, L.; LEI, T. Mapping landslide susceptibility at the Three Gorges Reservoir, China, using gradient boosting decision tree, Random Forest and information value models. **Journal of Mountain Science**, v. 17, n. 3, p. 670–685, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11629-019-5839-3>.

CHEN, W.; ZHANG, S. GIS-based comparative study of Bayes network, Hoeffding tree and logistic model tree for landslide susceptibility modeling. **Catena**, v. 203, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105344>.

CRUDEN, D. M.; VARNES, D. J. Landslide types and processes. In: TURNER, A. K.; SCHUSTER, R. L. (eds). **Landslides: Investigation and Mitigation**. Special Report 247, National Academy of Sciences, Transportation Research Board, Washington D.C., 1996. p. 36-75. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/209802944_Landslide_Types_and_Processes.

DANG, V.-H.; HOANG, N.-D.; NGUYEN, L.-M.-D.; BUI, D. T.; SAMUI, P. A Novel GIS-Based Random Forest Machine Algorithm for the Spatial Prediction of Shallow Landslide Susceptibility. **Forests**, v. 11, n. 1, p. 118, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/f11010118>.

DANTAS, M. E.; VIEIRO, A.C.; da SILVA, D. R. A. Origem das paisagens. In: Geodiversidade do Estado do Rio Grande do Sul. Org. VIEIRO, A. C.; da SILVA, D. R. A., (ed). 2010. CPRM: Porto Alegre, 2010, p.35-50.

DANTAS, M. E. Biblioteca de padrões de relevo: carta de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundação, 2016. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/16589>.

DI GREGORIO, L. T; SAITO, S. M.; SAUSEN, T. M. Sensoriamento Remoto para Gestão (de risco) de Desastres Naturais. In: SAUSEN, T.M. & LACRUZ, M.S.P,org. **Sensoriamento Remoto para Desastres**. –São Paulo: Oficina de Textos, 2015. ISBN: 978-85-7975-175-2.

DOU, J.; YUNUS, A. P.; TIEN BUI, D.; MERGHADI, A.; SAHANA, M.; ZHU, Z.; PHAM, B. T. Improved landslide assessment using a support vector machine with bagging, boosting, and stacking ensemble machine learning framework in a mountainous watershed, Japan. **Landslides**, v. 16, p. 2319-2330, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10346-019-01286-5>.

EM-DAT Emergency Database, OFDA/CRED – The Office of US Foreign Disaster Assistance/Centre for Research on the Epidemiology of Disasters – **Université Catholique de Louvain**, Brussels, Belgium, 2007. Disponível em: <https://www.emdat.be/publications/>.

EGAS, H. M.; STABILE, R. A.; DE ANDRADE, M. R. M; MENDES, T. S. G.; DE PAULA, D. S., NERY, T. D; DE ARAÚJO, J. P. C.; RECKZIEGEL, E. W.; GONÇALVES, D. A. Landslides Rio Grande do Sul April- May 2024, 2024a [Data set]. **Zenodo**. <https://doi.org/10.5281/zenodo.13225473>

EGAS, H. M.; STABILE, R. A.; DE ANDRADE, M. R. M; MICHEL, G. P.; DE ARAÚJO, J. P. C.; MICHEL, R. D. L.; MENDES, T. S. G.; NERY, T. D.; DE PAULA, D. S.; RECKZIEGEL, E. W. Comprehensive inventory and initial assessment of landslides triggered by autumn 2024 rainfall in Rio Grande do Sul, Brazil. **Landslides**, p. 1-11, 2024b. [10.1007/s10346-024-02410-w](https://doi.org/10.1007/s10346-024-02410-w)

GALLANT, J. C.; WILSON, J. P. Primary topographic attributes. In: WILSON, J. P.; GALLANT, J. C. (Eds.). *Terrain analysis: principles and applications*. Hoboken, N.J.: John Wiley, 2000. p. 51-86. ISBN 978-0471321880.

GAMEIRO, Samuel. Capacidade de generalização e extrapolação de redes neurais artificiais no mapeamento da suscetibilidade de deslizamentos. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento) – Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/209959>.

GAMEIRO, S.; DE OLIVEIRA, G. G.; GUASSELLI, L. A. The influence of sampling on landslide susceptibility mapping using artificial neural networks. *Geocarto International*, v. 38, n. 1, p. 1-23, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1080/10106049.2022.2144475>.

GHORBANZADEH, O.; SHAHABI, H.; CRIVELLARI, A.; HOMAYOUNI, S.; BLASCHKE, T.; GHAMISI, P. Landslide detection using deep learning and object-based image analysis. *Landslides*. 19. 929–939, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10346-021-01843-x>.

GIDDENS, A. **Teoria social**. As consequências da modernidade. São Paulo: Editora Unesp, 1991.

GIDES. **Gestão Integrada de Desastres de Sedimentos**. 2017.

DUTRA GOMES, R. Aspectos do determinismo científico e a geografia. **Terra Livre**, v. 1, n. 32, 2015. DOI: https://doi.org/10.62516/terra_livre.2009.280. Disponível em: <https://publicacoes.agb.org.br/terralivre/article/view/280>. Acesso em: 22 dez. 2024.

GU, T.; LI, J.; WANG, M.; DUAN, P.; ZHANG, Y.; CHENG, L. Study on landslide susceptibility mapping with different factor screening methods and random forest models. **PLoS one**, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0292897>.

GUISAN, A.; WEISS, S. B.; WEISS, A. D. GLM versus CCA spatial modeling of plant species distribution. **Plant Ecology**, v. 143, n. 1, p. 107–122, 1999. DOI:10.1023/a:1009841519580

GUIRRO, M. O.; MICHEL, G. P. Hydrological and hydrodynamic reconstruction of a flood event in a poorly monitored basin: a case study in the Rolante River, Brazil. **Natural Hazards**, v. 117, p. 723–743, 2023. DOI: 10.1007/s11069-023-05879-1. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11069-023-05879-1>.

HASENACK, H.; WEBER, E. (org.) Base cartográfica vetorial contínua do Rio Grande do Sul - escala 1:50.000. **Porto Alegre: UFRGS Centro de Ecologia**. 2010. 1 DVD-ROM. (Série Geoprocessamento n.3). ISBN 978-85-63483-00-5.

HARTSHORNE, R. The Nature of Geography. Lancaster, **Association of American Geographers**, 1939. Acesso em: https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/214/o/Livro-The_Nature_of_Geography.pdf.

HILL, T. P. The Significant-Digit Phenomenon. **The American Mathematical Monthly**, v. 102, n. 4, p. 322-327, 1995. DOI: <https://doi.org/10.1080/00029890.1995.11990578>.

HONG, H.; CHEN, W.; XU, C.; YOUSSEF, A. M.; PRADHAN, B.; TIEN BUI, D. Rainfall-induced landslide susceptibility assessment at the Chongren area (China) using frequency ratio, certainty factor, and index of entropy. **Geocarto International**, p. 1–16, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1080/10106049.2015.1130086>

HUANG, F.; CAO, Z.; GUO, J.; JIANG, S-H.; LI, S., GUO, Z. Comparisons of heuristic, general statistical and machine learning models for landslide susceptibility prediction and mapping. **Catena**, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104580>.

HUGGET, R. J. Soil Landscape System: a model of soil genesis. **Geoderma**, v. 75, p. 1-22, 1975. DOI: [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(75\)90035-X](https://doi.org/10.1016/0016-7061(75)90035-X).

HUNGR, O.; LEROUEIL, S.; PICARELLI, L. The Varnes classification of landslide types, an update. **Landslides**, v. 11, n. 2, p. 167-194, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10346-013-0436-y>.

IBGE. **Províncias estruturais, compartimentos de relevo, tipos de solos, regiões fitoecológicas e outras áreas**. Rio de Janeiro: IBGE, 2019. (Macrocaracterização dos Recursos Naturais do Brasil). 176 p. ISBN 9788524044878. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=2101648>. Acesso em: 22 dez. 2024.

IMAGEM DE RADAR METEOROLÓGICO DO MORRO DA IGREJA. Relatório técnico. São José dos Campos: Divisão de Tecnologias e Ciências Espaciais e Ambientais - DTCEA, órgão vinculado ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE no Brasil, 2017. Cedido por: Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais - CEMADEN/MCTI.

IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. **Classificação dos movimentos de massa**. São Paulo, 1991.

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo; Brasília, DF: CPRM – Serviço Geológico do Brasil: **Cartas de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundações: 1:25.000 (livro eletrônico)**: nota técnica explicativa / coordenação Omar Yazbek Bitar. -- São Paulo, 2014. ISBN 978-85-09-00177-3.

JULIÃO, R. P. (Coord.) *et al.* **Guia metodológico para a produção de cartografia municipal de risco e para a criação de sistemas de informação geográfica (SIG) de base municipal**. Lisboa: Autoridade Nacional de Proteção Civil; Direção-Geral do Ordenamento do Território

e Desenvolvimento Urbano; Instituto Geográfico Português, 2009. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10451/39562> . Acesso em: 21 dez. 2024.

LIN, L.; LIN, Q.; WANG, Y. Landslide susceptibility mapping on a global scale using the method of logistic regression. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 17, n. 8, p. 1411-1424, 2017. DOI: <https://doi.org/10.5194/nhess-17-1411-2017>.

LI, B.; WANG, N.; CHEN, J. GIS-based landslide susceptibility mapping using information, frequency ratio, and artificial neural network methods in Qinghai Province, northwestern China. **International Journal of Geosciences**, v. 1, n. 1, p. 1-20, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/4758062>

LIU, Z.; GILBERT G.; CEPEDA J. M. Modelling of shallow landslides with machine learning algorithms. **Geoscience Frontiers**, v. 12, n. 1, p. 385-393, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2020.04.014>.

MARZOLI, Andrea *et al.* Extensive 200-million-year-old continental flood basalts of the Central Atlantic Magmatic Province. **Science**, v. 284, n. 5414, p. 616-618, 1999. DOI: [10.1126/science.284.5414.616](https://doi.org/10.1126/science.284.5414.616).

MATLAB version: 9.14.0 (R2023a), Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc., 2023.

MEIS, M. R.; MONTEIRO, A. M. Upper Quaternary Rampas: Doce River Valley, Southeastern Brazilian Plateau. **Zeitschrift für Geomorphologie Stuttgart**, v. 23, n. 2, p. 132-151, 1979. Disponível em: <https://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=12803038>.

MENDES, R. M.; VALERIO FILHO, M.; SANTORO, J.; FARIA, D. G.-M.; PORTELA, V. D. A. Proposição de limiares críticos ambientais para uso em sistema de alertas de deslizamentos. **Revista do Departamento de Geografia**, 2020. DOI: <https://doi.org/10.11606/rdg.v40i0.165390>

MOGHIMI, A.; SINGHA, C.; FATHI, M.; PIRASTEH, S.; MOHAMMADZADEH, A.; VARSHOSAZ, M.; HUANG, J.; LI, H. Hybridizing genetic random forest and Self-Attention based CNN-LSTM algorithms for landslide susceptibility mapping in Darjiling and Kurseong, India. **Quaternary Science Advances**, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.qsa.2024.100187>.

MOORE, I. D.; GRAYSON, R. B.; LADSON, A. R. Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications. **Hydrological Processes**, v. 5, n. 1, 1991. DOI: <https://doi.org/10.1002/hyp.3360050103>.

NEGRI, R. G. **Reconhecimento de Padrões**: Um estudo dirigido. 2021. ISBN: 978-6555061635.

OH, H.-J. *et al.* GIS mapping of regional probabilistic groundwater potential in the area of Pohang City, Korea. **Journal of Hydrology**, v. 401, n. 1-2, p. 118-128, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.12.027>.

PAIXÃO, M.; KOBİYAMA, M.; ZAMBRANO, F.; MICHEL, G.; MAINARDI FAN, F. Lições sobre o gerenciamento de desastres hidrológicos obtidas a partir da ocorrência em Rolante/RS. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 7, p. 251-267, 2018. DOI: [10.19177/rgsa.v7e02018251-267](https://doi.org/10.19177/rgsa.v7e02018251-267)

PAPATHOMA-KÖHLE, M.; KEILER, M.; TOTSCHNIG, R.; GLADE, T. Improvement of vulnerability curves using data from extreme events: debris flow event in South Tyrol. **Natural Hazards**, v. 64, n. 3, p. 2083–2105, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0105-9>.

PARK, S.; LEE, C.; LEE, S.; LEE, M. Landslide Susceptibility Mapping and Comparison Using Decision Tree Models: A Case Study of Jumunjin Area, Korea. **Applied Sciences**, v. 8, n. 10, p. 1925, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs10101545>.

PARK, S.; KIM, J. Landslide Susceptibility Mapping Based on Random Forest and Boosted Regression Tree Models, and a Comparison of Their Performance. **Applied Sciences**, v. 9, n.5, 942, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/app9050942>.

PEATE, D. W.; HAWKESWORTH, C. J.; MANTOVANI, M. S. M.; ROGERS, N. W.; TURNER, S. P. Petrogenesis and stratigraphy of the high Ti/Y Urubici magma type in the Paraná flood basalt province and implications for the nature of the “Dupal”-type mantle in the South Atlantic region. **Journal of Petrology**, 1999. DOI: <https://doi.org/10.1093/petroj/40.3.451>.

PEDREGOSA, F.; VAROQUAUX, G.; GRAMFORT, A.; MICHEL, V.; THIRION, B.; BONDLEL, M. *et al.* Scikit-learn: Machine Learning in Python, **Journal of Machine Learning Research**, v. 12, p. 2825-2830, 2011.

PENCK, Walther. Morphological Analysis of Land Forms. **Soil Science**, v. 77, n. 1, p. 80, 1953.

PFALTZGRAFF, P. A. dos S. Mapa de suscetibilidade a deslizamentos na região metropolitana do Recife. Tese (Doutorado em Geociências), Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/6331>.

PODDAR, I.; ROY, R. Application of GIS-based data driven bivariate statistical models for landslide prediction: a case study of highly affected landslide prone areas of Teesta River basin, **Quaternary Science Advances**, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.qsa.2023.100150>.

PRADHAN, B. Landslide susceptibility mapping of a catchment area using frequency ratio, fuzzy logic and multivariate logistic regression approaches. **Journal of the Indian Society of Remote Sensing**, v. 38, n. 2, p. 301–320. 2010. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12524-010-0020-z>.

QUEVEDO, R. P.; OLIVEIRA, G. G. de; GAMEIRO, S.; RUIZ, L. F. C.; GUASSELLI, L. A. Modelagem de áreas suscetíveis a movimentos de massa com redes neurais artificiais. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (XIX; 2019; [local do evento]). Anais...São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2019. ISBN 978-85-17-00097-3. Disponível em: <http://marte2.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/marte2/2019/09.30.17.55/doc/97635.pdf>. Acesso em: 21 dez. 2024.

RAJA, N. B.; İİİEK, I.; TÜRKOĞLU, N.; AYDIN, O.; KAWASAKI, A. Correction to: Landslide susceptibility mapping of the sera river basin using logistic regression model. **Natural Hazards**, v. 91, p. 1423, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11069-017-3145-3>.

REICHENBACH, Paola *et al.* A review of statistically-based landslide susceptibility models. **Earth-science reviews**, v. 180, p. 60-91, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.03.001>.

RIFFEL, E. S.; GUASSELLI, L. A.; RUIZ, L. F. C.; GAMEIRO, S. Relação entre ponto de ruptura e padrão morfométrico em deslizamentos, bacia hidrográfica do Rio Rolante - RS. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 41, n. 1, e181554, 2021. DOI: <https://doi.org/10.11606/eISSN.2236-2878.rdg.2021.181554>.

RILEY, S. J.; DEGLORIA, S. D.; ELLIOT, R. A terrain ruggedness index that quantifies topographic heterogeneity. **Intermountain Journal of Sciences**, v. 5, p. 23–27, 1999. Disponível em: https://download.osgeo.org/qgis/doc/reference-docs/Terrain_Ruggedness_Index.pdf.

SAHIN, E. K.; COLKESEN, I.; ACMALI, S. S.; AKGUN, A.; AYDINOGLU, A. C. A. Developing comprehensive geocomputation tools for landslide susceptibility mapping: LSM tool pack. **Computers & Geosciences**, v. 144, p. 104592, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2020.104592>.

ROSS, J. L. S. O registro cartográfico dos fatos geomórficos e a questão da taxonomia do relevo. **Revista do Departamento de Geografia FFLCH-USP**, São Paulo, 1992.

ROSS, J. L. S. **Análise empírica dos ambientes naturais antropizados**. Laboratório de Geomorfologia. Departamento de Geografia, Universidade de São Paulo, 1993.

SAITO, S. Estudo analítico da suscetibilidade a escorregamentos e quedas de blocos no maciço central de Florianópolis-SC. Dissertação (mestrado em Geografia) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2004. Disponível em: <http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/87389>.

SEGUE, W. Stephane *et al.* Advancements in mapping landslide susceptibility in Bafoussam and its surroundings area using multi-criteria decision analysis, statistical methods, and machine learning models. **Journal of African Earth Sciences**, v. 213, p. 105237, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2024.105237>.

SHIRVANI, Z. A holistic analysis for landslide susceptibility mapping applying geographic object-based random forest: A comparison between protected and non-protected forests. **Remote Sensing**, v. 12, n. 3, p. 434, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12030434>.

S2ID - Sistema Integrado de Informações Sobre Desastres. Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil. Ministério do Desenvolvimento Regional (SEDEC/MDR/Brasil). Relatório Gerencial: Dados Informados. Disponível em: <https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/protecao-e-defesa-civil/sistema-integrado-de-informacoes-sobre-desastres>.

TAALAB, K.; CHENG, T.; ZHANG, Y. Mapping landslide susceptibility and types using random forest. **Big Earth Data**, v. 2, n. 2, p. 159–178, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1080/20964471.2018.1472392>.

TIEN BUI, D.; TUAN, T. A.; KLEMPE, H. *et al.* Spatial prediction models for shallow landslide hazards: a comparative assessment of the efficacy of support vector machines, artificial neural networks, kernel logistic regression, and logistic model tree. **Landslides**, v. 13, p. 361–378, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10346-015-0557-6>.

TOBIN, G. A.; MONTZ, B. E. **Natural Hazards: explanation and integration**. New York: The Guilford Press. 388 p., 1997. ISBN: 1-57230-061-2.

TOMINAGA, L. K; FERREIRA, C. J. **Cartas de perigo a escorregamentos e de risco a pessoas e bens do Litoral Norte de São Paulo**: conceitos e técnicas. Cartografia Geotécnica e Ambiental-Conhecimento do meio físico: base para a sustentabilidade. São Paulo: ABGE, p. 205-216, 2004. Disponível em: <http://www.researchgate.net/publication/278016537>.

TOMINAGA, L. K. Avaliação de metodologias de análise de risco a escorregamento: aplicação de um ensaio em Ubatuba, SP. Tese (Doutorado em Geografia Física), Departamento de Geografia, FFLCH-USP. São Paulo, 2007. 220 p. DOI: <https://doi.org/10.11606/T.8.2007.tde-18102007-155204>.

TORRES, Fernanda Soares de Miranda. Carta de suscetibilidade a movimentos de massa e erosão do município de Ipojuca, PE. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2014. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/46379>. Acesso em: 21 dez. 2024.

UEHARA, T.; KÖRTING, T.; SOARES, A.; QUEVEDO, R.P. Time-series metrics applied to land use and land cover mapping with focus on landslide detection. **Journal of Applied Remote Sensing**, v. 16, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1117/1.JRS.16.034518>.

UNISDR, UNDP *et al.* **Making Disaster Risk Reduction Gender Sensitive: Policy and Practical Guidelines**. 2009. Disponível em: <https://www.unisdr.org/2022/dipecholac.net/docs/files/62-makingdisasterriskreductiongendersensitive.pdf>.

UNITED NATIONS OFFICE FOR DISASTER RISK REDUCTION – UNDRR. **The Sendai Framework Terminology on Disaster Risk Reduction**. “Disaster risk”. 2017. Disponível em: <https://www.undrr.org/terminology/disaster-risk>. Acesso em: 28 jun. 2025.

Universidade Federal de Santa Catarina. Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres. Atlas Brasileiro de Desastres Naturais: 1991 a 2012. Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres. 2. ed. rev. ampl. – Florianópolis: CEPED UFSC, 2013.

VALERIANO, M. Programação do cálculo da declividade em SIG pelo método de vetores ortogonais. **Revista Espaço e Geografia**, p. 69-85, 2002. ISSN 1516-9375.

VARNES, D. J. Slope movement types and processes. **In**: SCHUSTER, R. L.; KRIZEK, R. J. (eds). Landslides: Analysis and Control. Special Report 176, National Academy of Sciences, Transportation Research Board, Washington D.C., p. 11-33. 1978. Disponível em: <https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/sr/sr176/176-002.pdf>.

VIEIRO, A. C.; SILVA, D. R. A. **Geodiversidade do estado do Rio Grande do Sul**. Org. Ana Cláudia Vieiro e Diogo Rodrigues Andrade da Silva. – Porto Alegre: CPRM, 2010. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/16774>.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. **Predicting rainfall erosion losses – a guide to conservation planning**. Agricultural Handbook No.537. US Department of Agriculture: Washington, D.C, 1978. Disponível em: https://books.google.com.br/books/about/Predicting_Rainfall_Erosion_Losses.html?id=rRAUAAAAYAAJ&redir_esc=y.

ZANANDREA, F.; MICHEL, G.; KOBIYAMA, M.; CARDOZO, G. Evaluation of different DTMs in sediment connectivity determination in the Mascarada River Watershed, southern Brazil. **Geomorphology**, v. 332, p. 80-87, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.01.019>.

ZHOU, X.; WEN, H.; ZHANG, Y.; XU, J.; ZHANG, W. Landslide susceptibility mapping using hybrid Random Forest with GeoDetector and RFE for factor optimization. **Geoscience Frontiers**, v. 12, n. 5, p. 101211, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2021.101211>.