

**NILZO IVO LADWIG
THAISE SUTIL
DANRLEI DE CONTO
(Organizadores)**

PAISAGEM E TERRITÓRIO NO GEOPROCESSAMENTO

Atena
Editora
Ano 2022



Editora chefe

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Editora executiva

Natalia Oliveira

Assistente editorial

Flávia Roberta Barão

Bibliotecária

Janaina Ramos

Projeto gráfico

Bruno Oliveira

Camila Alves de Cremo

Luiza Alves Batista

Natália Sandrini de Azevedo

Imagens da capa

iStock

Edição de arte

Luiza Alves Batista

2022 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do texto © 2022 Os autores

Copyright da edição © 2022 Atena Editora

Direitos para esta edição cedidos à Atena Editora pelos autores.

Open access publication by Atena Editora



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição *Creative Commons*. Atribuição-Não-Comercial-NãoDerivativos 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0).

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores, inclusive não representam necessariamente a posição oficial da Atena Editora. Permitido o *download* da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Todos os manuscritos foram previamente submetidos à avaliação cega pelos pares, membros do Conselho Editorial desta Editora, tendo sido aprovados para a publicação com base em critérios de neutralidade e imparcialidade acadêmica.

A Atena Editora é comprometida em garantir a integridade editorial em todas as etapas do processo de publicação, evitando plágio, dados ou resultados fraudulentos e impedindo que interesses financeiros comprometam os padrões éticos da publicação. Situações suspeitas de má conduta científica serão investigadas sob o mais alto padrão de rigor acadêmico e ético.

Conselho Editorial**Ciências Humanas e Sociais Aplicadas**

Prof. Dr. Adilson Tadeu Basquerote Silva – Universidade para o Desenvolvimento do Alto Vale do Itajaí

Prof. Dr. Alexandre de Freitas Carneiro – Universidade Federal de Rondônia

Prof. Dr. Alexandre Jose Schumacher – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Paraná

Prof. Dr. Américo Junior Nunes da Silva – Universidade do Estado da Bahia

Profª Drª Ana Maria Aguiar Frias – Universidade de Évora

Profª Drª Andréa Cristina Marques de Araújo – Universidade Fernando Pessoa



Paisagem e território no geoprocessamento

Diagramação: Natália Sandrini de Azevedo
Correção: Maiara Ferreira
Indexação: Amanda Kelly da Costa Veiga
Revisão: Os autores
Organizadores: Nilzo Ivo Ladwig
Thaise Sutil
Danlei De Conto

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

P149 Paisagem e território no geoprocessamento / Organizadores Nilzo Ivo Ladwig, Thaise Sutil, Danlei De Conto. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2022.

Formato: PDF
Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader
Modo de acesso: World Wide Web
Inclui bibliografia
ISBN 978-65-258-0550-4
DOI: <https://doi.org/10.22533/at.ed.504221609>

1. Geografia política. 2. Território. 3. Paisagem. I. Ladwig, Nilzo Ivo (Organizador). II. Sutil, Thaise (Organizadora). III. Conto, Danlei De (Organizador). IV. Título. CDD 320.12

Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

Atena Editora
Ponta Grossa – Paraná – Brasil
Telefone: +55 (42) 3323-5493
www.atenaeditora.com.br
contato@atenaeditora.com.br



Atena
Editora
Ano 2022

ANÁLISE MULTICRITÉRIO NA RESTITUIÇÃO MULTITEMPORAL DE ÁREAS SUSCETÍVEIS À ESCORREGAMENTOS

William de Oliveira Sant Ana

Professor Dr. e Analista de Estudos e Projetos da UNISATC

Álvaro José Back

Professor Dr. do PPGCA/UNESC

Gean Paulo Michel

Professor Dr. do IPH/UFRGS

RESUMO: Movimentos de massa em encostas, a exemplo dos escorregamentos, podem resultar em impactos socioeconômicos e ambientais. O estado de Santa Catarina é periodicamente afetado por estes fenômenos, portanto, há registro histórico de escorregamentos no território, que nem sempre estão mapeados com assertividade espacial, o que dificulta adoção de medidas preventivas. A Análise Multicritério, que pode ser aplicada pela Análise Hierárquica de Processos – AHP, é ferramenta reconhecido em geociências e no geoprocessamento, oportunizando hierarquizar diferentes fatores (mapas temáticos) pela opinião de especialistas, como uma medida de probabilidade para avaliação de riscos. Em adição, se a Análise Multicritério for balizada por informações multitemporais de cicatrizes de escorregamentos, poder-se-á, por álgebra de mapas, obter modelos restituídos de eventos pretéritos. Este trabalho objetiva aplicar Análise Multicritério, pela AHP, para restituição de áreas suscetíveis à escorregamentos nas cabeceiras do rio Mãe Luzia, município de Treviso, estado de Santa Catarina. Para atingir o objetivo, sete

fatores predisponentes aos escorregamentos foram hierarquizados compondo uma equação de suscetibilidade aos escorregamentos na área de estudo, além disso, suas classes componentes receberam pesos orientados por inventários de cicatrizes de escorregamentos, para o ano de 1957 e 1978. A partir de fotografias aéreas antigas permitiu-se efetuar observações que considerem a relação da abrangência de escorregamentos do passado sobre classes componentes de um mapa temático. A aplicação da equação ponderada pela incidência das cicatrizes, nas diferentes datas, resultou num mapa final de restituição de áreas suscetíveis aos escorregamentos, para 1957 e, também, para 1978. Como ferramentas de validação dos modelos, averiguando sua especificidade e sua sensibilidade, adotou-se Índices de Acerto e Erro, bem como, as Curvas ROC - *Receiver Operating Characteristic*, que permitem informar a capacidade discriminante do modelo de predição, pelo exame da *Area Under the Curve* – AUC. Para o modelo validado por cicatrizes de 1957 a AUC totalizou 0,78 e para 1978, 0,80, indicando modelos de restituição de alta capacidade discriminante, ou seja, locais zoneados como de alta suscetibilidade aos escorregamentos, de fato, já escorregaram no passado. Outro resultado é que os eventos registrados para 1957 diferem espacialmente daqueles registrados nas fotografias de 1978, ou seja, ocorreram em setores distintos das vertentes, denotando que no intervalo temporal entre 1957-78 não há tempo suficiente para que haja formação de

manto de intemperismo passível de escorregar no mesmos locais das encostas. Conclui-se que restituir modelos elucidam o passado e serve como dados de calibração ou treinamento para modelagens preditivas. Ademais, a curva ROC é um excelente recurso para validar a capacidade discriminante de modelos de restituição pretérita de escorregamentos.

PALAVRAS-CHAVE: Movimentos de Massa; Modelagem Cartográfica; Curva ROC.

1 | INTRODUÇÃO

Os movimentos de massa em encostas, fenômenos majoritariamente naturais, contudo, podem resultar em riscos em várias partes do mundo acarretando consequências negativas para os ecossistemas naturais e para a sociedade (VAN DEN EECKHAUT *et al.*, 2012). Um exemplo dá-se na região Sul Brasileira, periodicamente afetada por estes fenômenos extremos (SAITO *et al.*, 2009).

Eventos de movimentos de massa, fluxos de detritos e inundações em Santa Catarina já provocaram, e tendem a continuar, uma série de desastres com prejuízos socioeconômicos e ambientais. No sul do estado, num passado recente, ocorreram episódios de grande magnitude, como no ano de 1974 (ASSUNÇÃO, 2014; MATEUS, 2016), que atingiu o município de Tubarão, ou em 1995 (PELLERIN *et al.*, 1997), que ficou concentrado na Bacia Hidrográfica do Rio Araranguá - BHRA. Outro exemplo notório deu-se no ano de 2008, no Vale do Itajaí (LUDWIG; MATTEDI, 2016), com proeminentes perdas materiais e imateriais.

Leroi *et al.* (2005) e Fell *et al.* (2008) apontam que estudos sobre escorregamentos/ estabilidade de encostas são uma demanda de elevada importância, principalmente pelo papel que exercem em ações de planejamento e gestão ambiental, territorial e de riscos. Como recurso ao mapeamento de eventos pretéritos de escorregamentos em encostas, fotografias aéreas antigas constituem um importante acervo para estudos em Cartografia, Geografia, Ciências Ambientais e áreas correlatas, ofertando um fiel retrato das condições espaciais numa determinada data (BRITO; COELHO FILHO, 2007), com um nível de detalhe passível de se tornarem informações componentes de um mapa temático.

Verhoeven *et al.* (2010) ressaltam que milhões de fotografias aéreas são apenas armazenadas, onde sua informação pretérita pode (ou não) ser explorada eficientemente. Isso é lamentável, uma vez que a compreensão completa das paisagens pretéritas é baseada na combinação das evidências interpretadas de vários métodos de prospecção e, para serem úteis, conforme destacam Del Soldato *et al.* (2018), estas fotografias devem ser georreferenciadas e, se possível, também ortoretificadas.

Um inventário de cicatrizes de escorregamentos efetuado a partir de fotografias aéreas antigas permite a aplicação de uma posterior técnica estatística, de se efetuar observações que considerem a relação da abrangência de escorregamentos do passado

sobre classes componentes de um mapa temático (STARK; GUZZETTI, 2009). Com cicatrizes digitalizadas pode-se estabelecer a densidade normalizada de cicatrizes de escorregamentos, levando-se em consideração a área afetada e a área total das classes de cada mapa temático (IPT, 2014) contribuindo para aplicação de uma Análise Multicritério.

A Análise Multicritério combina diversos mapas temáticos e utiliza-se da reconhecida opinião de especialistas, como uma medida de probabilidade subjetiva para avaliação de riscos, sendo reconhecido o emprego da Análise Hierárquica de Processos – AHP (SAATY, 1977, 1991). Conforme Komac (2006) a AHP vem sendo empregada em diversos estudos de casos em estudos de suscetibilidade ambiental e escorregamentos, que resultam em mapas combinados, ou modelos de resposta (MAGALHÃES *et al.*, 2011).

Um mapa final, obtido pelo cruzamento de diferentes mapas temáticos, ou fatores, pode apresentar inconsistências espaciais. Para validar se um modelo idealizado para escorregamentos está identificando falsos positivos, ou seja, áreas que nunca irão escorregar, mas estão classificados como tal, ou ainda, falsos negativos existe a métrica de desempenho da predição, as Curvas ROC - *Receiver Operating Characteristic*. A curva define se um modelo tem sensibilidade e especificidade, e Silalahi, Arifianti e Hidayat (2019) afirmam que a validação de cálculos mostra quão bem o modelo pode prever eventos futuros desconhecidos.

Diante desta problemática, de desastres naturais recorrentes em Santa Catarina, e da possibilidade de utilizar-se de cicatrizes de escorregamentos para mapeamentos multitemporais mais precisos, este trabalho objetiva efetuar Análise Multicritério, pela AHP, para restituição de áreas suscetíveis à escorregamentos translacionais rasos numa área piloto no estado de Santa Catarina.

1.1 Área de estudo

A área de estudo é majoritária de encostas naturais florestadas, na sub-bacia formada pelas cabeceiras do rio Mãe Luzia (22,39 km²), dentro da Bacia Hidrográfica do Rio Araranguá - BHRA, localizada no município de Treviso, Estado de Santa Catarina (Figura 1). As encostas naturais nesta sub-bacia apresentam registros de centenas de cicatrizes de escorregamentos, datadas em contextos temporais distintos (SANT ANA *et al.*, 2020; SANT ANA, 2021), registradas por voos aerofotogramétricos de 1957 e 1978 (Figura 2).

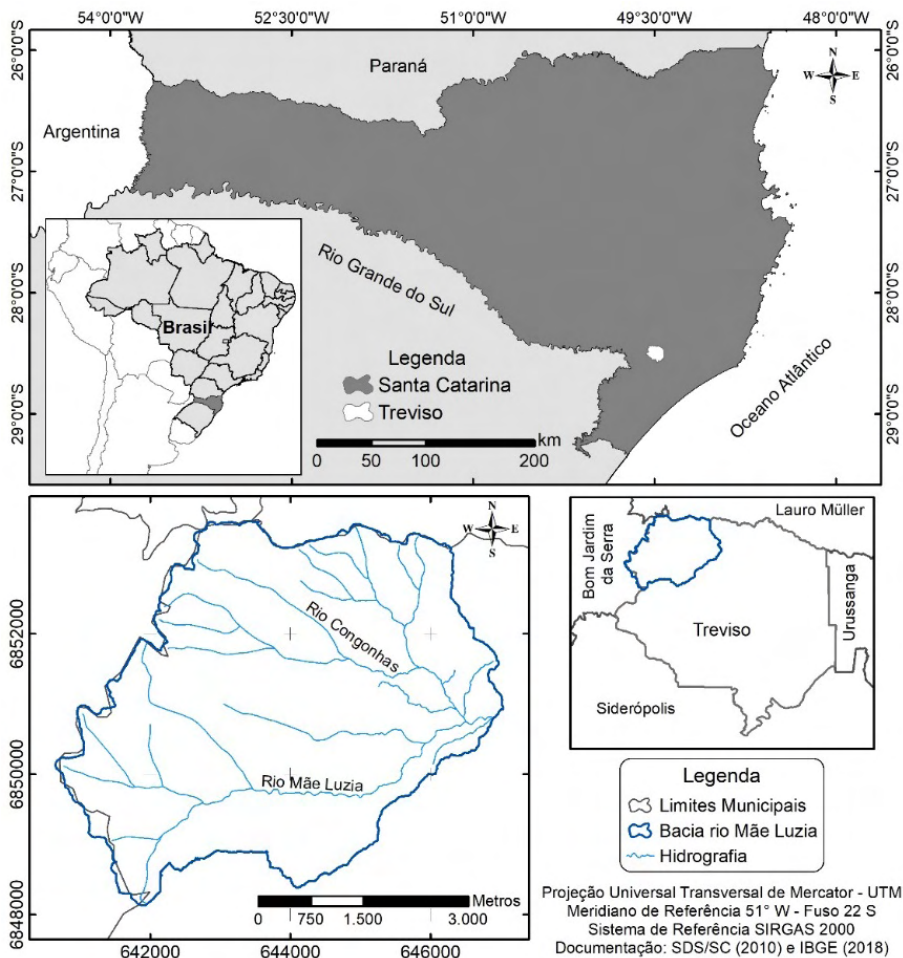


Figura 1 –Localização da bacia hidrográfica do rio Mãe Luzia.

Fonte: Autores (2020).

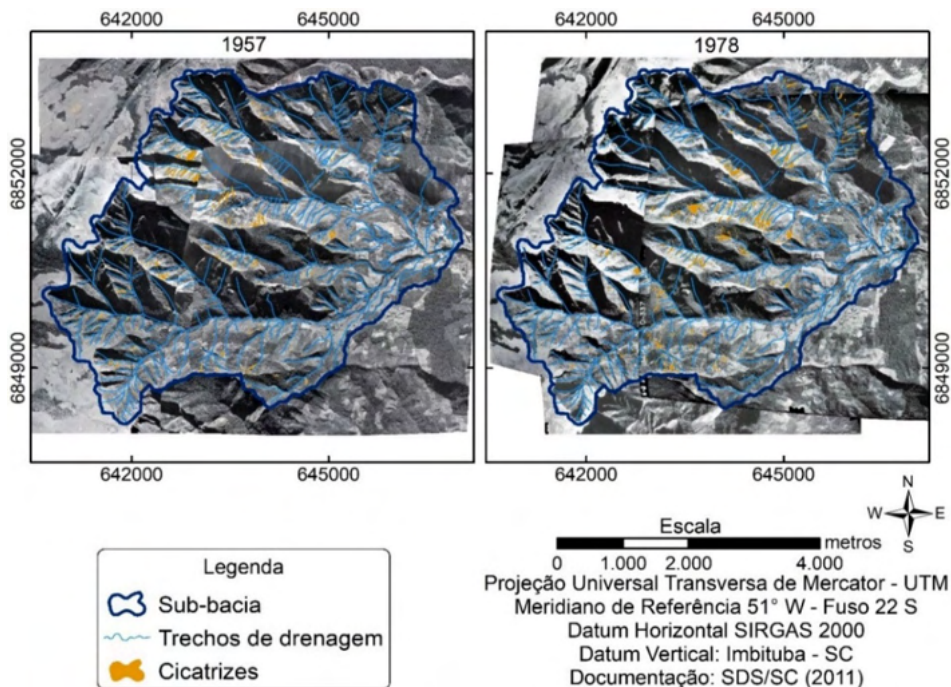


Figura 2 - Área de estudo e cicatrizes de escorregamentos para os anos de 1957 e 1978.

Fonte: Autores (2020).

2 | MATERIAIS E MÉTODOS

Para restituição das áreas suscetíveis à escorregamentos, com base em Roodposhti, Aryal e Pradhan. (2019) e Deng, Li e Tan (2017), foram considerados sete níveis de informação, tratados no estudo como fatores predisponentes aos escorregamentos. Assim, os fatores considerados de nível de informação básica foram os seguintes:

- Declividade e Hipsometria: obtidas com o MDT, feito a partir de base planialtimétrica da Secretaria de Desenvolvimento Sustentável (SDS, 2011), que possui resolução espacial de 1m x 1m. Fez-se o emprego de seis classes distintas para declividade - EMBRAPA (RAMALHO-FILHO; BEEK, 1995). Neste trabalho os intervalos de hipsometria foram baseados nos estudos de Dai e Lee (2002).
- Orientação das vertentes: obtida com o MDT (SDS, 2011). Foram consideradas as vertentes voltadas com face para os pontos cardeais e colaterais, além das planas (total de 9 orientações).
- Feições ou curvaturas das vertentes: Seguiu-se com o proposto por Torres (2014) e ESRI (2018), de que as diferentes associações determinam vertentes de distintos

graus de risco para escorregamentos. Para obter-se estes níveis de informação também se utilizou do MDT (SDS, 2011).

- Geologia: foram consultados mapas geológicos elaborados pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM) através do Programa de Levantamentos Geológicos Básicos (PLGB), apresentado por Krebs (2004).

- Tipos de solo: para esta temática foi realizada reclassificação do mapa de solos, que tomou como base os mapas de solos da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, EMBRAPA (1998; 1999) e da Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina, EPAGRI (1999).

- Cobertura do solo: Foi realizada por interpretação e digitalização das classes, sobre a ortofoto cor natural da base cartográfica (SDS, 2011). A digitalização da cobertura do solo seguiu as recomendações temáticas do Manual Técnico de Uso da Terra (IBGE, 2013).

2.1 Hierarquização e cruzamento dos fatores

Antes de hierarquizar e cruzar os sete fatores se fez necessária a reclassificação de suas classes componentes, seguindo um mesmo critério. Nesse estudo esta atribuição de pesos às classes de cada fator baseou-se no inventário de cicatrizes de escorregamentos. O inventário permitiu a aplicação de técnica estatística, de se efetuar a relação da abrangência de escorregamentos do passado (1957 e 1978) sobre cada fator. Em outras palavras, as classes temáticas dos fatores, receberam pesos distintos, que obedeceram à razão entre porcentagem de ocorrência e porcentagem de área movimentada (Grandeza Adimensional - GA), quanto maior o valor deste quociente, maior o peso atribuído as classes temáticas de cada fator, que apresentaram suscetibilidade aos escorregamentos. Com base nas estatísticas de Densidade Normalizada (Dn) de escorregamentos pretéritos para cada classe de cada fator, foi restituído um modelo ideal para o evento registrado pelas fotografias aéreas de 1957, outro para 1978. Estes dois mapas finais resultantes refletiram à restituição de eventos passados de suscetibilidade aos escorregamentos para esta área de estudo (IPT, 2014).

Para inventariar cicatrizes de escorregamentos foram usadas fotografias aéreas de números 952, 954, 958 e 959, para o ano de 1957, e 18.486, 18.487, 18.488, 23.049, 23.051 e 23.073, para 1978, ambos os voos na escala 1:25.000, obtidas pela empresa “Serviços Aerofotogramétricos Cruzeiro do Sul S.A.” Todas as fotografias aéreas foram escaneizadas em 600 *dpi* (formato *.tiff*), posteriormente, ortorretificadas na EFD E-Foto, sobre a base cartográfica (SDS, 2011), no *Datum* horizontal SIRGAS 2000, Sistema de Projeção UTM, Meridiano Central 51°, Fuso 22 Sul. A versão utilizada no E-Foto foi a 2016.06.425, de junho de 2016, a última disponível.

Na hierarquização foi empregada a AHP (SAATY, 1977; 1991), que vem sendo usada em diversos estudos de suscetibilidade à escorregamentos (KOMAC, 2006; NGUYEN, LIU, 2019). De acordo com Brito *et al.* (2017), os fatores predisponentes foram comparados aos pares, na Escala Fundamental de Saaty, que varia de 1/9 a 9, ou seja, do menos ao mais importante, decompondo problemas complexos em comparações mais simples para tomada de decisão. Os resultados da aplicação do método AHP foram considerados para atribuir pesos hierárquicos, estes procedimentos foram descritos detalhadamente em Sant Ana (2021), sendo aqui apresentada somente a hierarquia (coeficientes multiplicadores) já obtida para os sete fatores predisponentes (Equação 1). A equação é passível de ser inserida numa calculadora *raster* de *software* de geoprocessamento para efetuar a álgebra de mapas, de modo a apresentar 5 diferentes classes espaciais para suscetibilidade: muito alta até a muito baixa (BAHRAMI *et al.*, 2019).

$$\text{Suscetibilidade aos escorregamentos} = 0,333D + 0,054H + 0,091L + 0,206TS + 0,167FT + 0,092CS + 0,056OV \quad (1)$$

Em que:

D = Declividade (GA);

H = hipsometria (GA);

L = litologia (GA);

TS = tipo de solo (GA);

FT = forma do terreno (GA);

CS = cobertura do solo (GA);

OV = orientação das vertentes (GA);

2.2 Validação dos modelos

Foram adotados os índices propostos por Sorbino, Sica e Cascini (2010), denominados Índices de Acerto (IA), Equação (2), e Índice de Erro (IE), Equação (3), verificando-se o quanto da área definida como instável em cada modelo coincidiu com as cicatrizes (Área Dentro), e quanto da área definida como instável ficou fora das cicatrizes pretéritas (Área Fora). Também foi considerado como área instável o total de cicatrizes mapeadas e área estável a diferença entre a área total de estudo em relação a área ocupada pelas cicatrizes restituídas.

$$IA = \left(\frac{\text{Área Dentro}}{\text{Área Instável}} \right) * 100 \quad (2)$$

$$IE = \left(\frac{\text{Área Fora}}{\text{Área Estável}} \right) * 100 \quad (3)$$

Os resultados dos cálculos de IA e IE foram plotados como uma curva no espaço bidimensional, sendo IA = Y e IE = X, definido como espaço ROC, capaz de classificar a validade do modelo para predição, ou mesmo, para restituição de eventos ocorridos. Conforme Deng, Li e Tan (2017) a área formada sob a curva (*Area Under the Curve – AUC*), calculada a partir da curva ROC, valida a precisão de um modelo de escorregamento em dois aspectos: habilidade de previsão e ajuste do modelo.

3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para correlacionar os fatores com o local dos escorregamentos pretéritos foi elaborada a Figura 3. Nesta etapa, os polígonos das cicatrizes editadas sobre as fotografias ortorretificadas foram sobrepostos aos mapas base, de hipsometria (Figura 3-a), declividade (Figura 3-b), formas do terreno (Figura 3-c), orientação das vertentes (Figura 3-d), litologias (Figura 3-e), tipos de solo (Figura 3-f) e cobertura do solo (Figura 3-g e h) da área de estudo. Desta forma, conseguiu-se extrair a frequência de escorregamentos para cada categoria de cada fator predisponente (Dn).

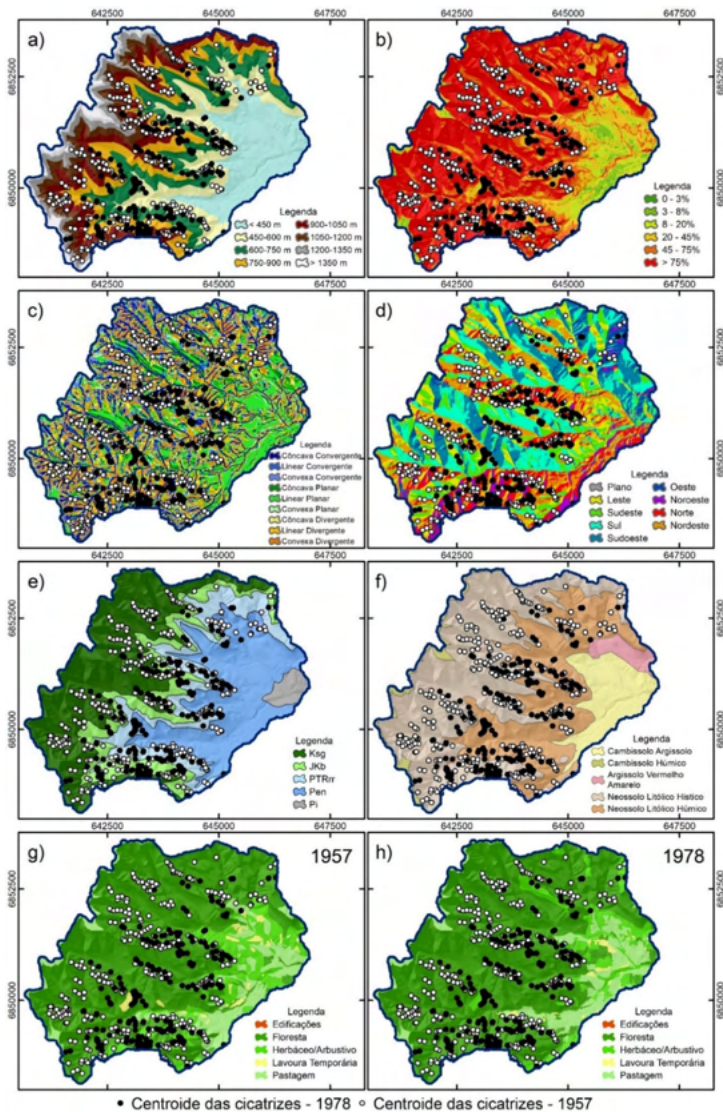


Figura 3 – Centroides das cicatrizes restituídas sobre os fatores predisponentes.

Fonte: Autores (2021).

Uma vez estabelecidas as densidades normalizadas (D_n) de cada classe de cada fator predisponente, a partir do inventário de cicatrizes (Tabela 1), a análise multicritério foi aplicada pela combinação deste viés estatístico de pesos normalizados das classes dos fatores com a AHP com o emprego da Equação 1.

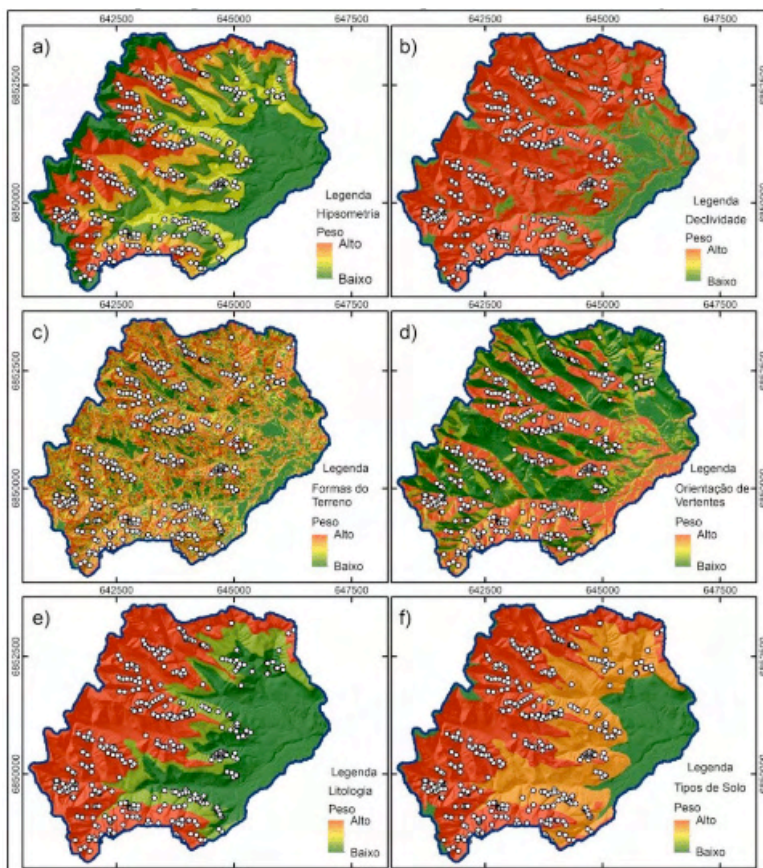
| Fator | Classe | Área da classe (ha) | | Escorregamentos (ha) | | (Dn) | |
|--------------------|---------------------------|---------------------|----------|----------------------|--------------|--------------|--------------|
| | | | | 1957 | 1978 | 1957 | 1978 |
| Hipsometria (m) | < 450 | 384,348 | | 0,267 | 0,087 | 0,060 | 0,025 |
| | 450 a 600 | 331,371 | | 3,823 | 5,174 | 0,994 | 1,738 |
| | 600 a 750 | 399,789 | | 2,336 | 9,580 | 0,503 | 2,667 |
| | 750 a 900 | 356,128 | | 5,700 | 7,918 | 1,379 | 2,475 |
| | 900 a 1050 | 317,304 | | 10,307 | 2,850 | 2,799 | 1,000 |
| | 1050 a 1200 | 204,718 | | 4,295 | 0,097 | 1,808 | 0,053 |
| | 1200 a 1350 | 131,839 | | 0,611 | 0,032 | 0,399 | 0,027 |
| | > 1350 | 113,736 | | 0,075 | 0,015 | 0,057 | 0,015 |
| Declividade | 0 - 3 | 11,840 | | 0,003 | 0,000 | 0,048 | 0 |
| | 3 - 8 | 60,150 | | 0,008 | 0,000 | 0,029 | 0,001 |
| | 8 - 20 | 150,310 | | 0,039 | 0,058 | 0,058 | 0,069 |
| | 20 - 45 | 251,442 | | 0,282 | 0,659 | 0,252 | 0,475 |
| | 45 - 75 | 410,795 | | 2,901 | 3,598 | 1,591 | 1,587 |
| | > 75 | 1354,698 | | 24,182 | 21,438 | 4,022 | 2,868 |
| Litologia | Ksg | 853,344 | | 17,133 | 4,112 | 1,756 | 0,306 |
| | JKb | 339,487 | | 4,730 | 8,261 | 1,218 | 1,546 |
| | PTRr | 370,041 | | 2,570 | 11,234 | 0,607 | 1,929 |
| | Pen | 622,716 | | 2,981 | 2,145 | 0,419 | 0,219 |
| | Pi | 53,648 | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Formas do terreno | Côncava Convergente | 397,559 | | 5,757 | 7,392 | 1,165 | 1,466 |
| | Linear Convergente | 124,935 | | 1,828 | 2,965 | 1,177 | 1,872 |
| | Convexa Convergente | 135,302 | | 2,574 | 3,145 | 1,530 | 1,833 |
| | Côncava Planar | 198,897 | | 1,520 | 1,362 | 0,615 | 0,540 |
| | Linear Planar | 373,475 | | 1,919 | 1,891 | 0,414 | 0,399 |
| | Convexa Planar | 196,997 | | 2,165 | 2,304 | 0,884 | 0,922 |
| | Côncava Divergente | 163,635 | | 1,848 | 1,364 | 0,909 | 0,658 |
| | Linear Divergente | 198,485 | | 2,428 | 1,668 | 0,984 | 0,663 |
| Convexa Divergente | 449,951 | | 7,392 | 3,692 | 1,322 | 0,647 | |
| Cobertura do solo | | 1957 | 1978 | x | x | x | x |
| | Edificações | 0,328 | 0,349 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | Florestal | 1689,964 | 1773,673 | 23,475 | 24,769 | 1,487 | 2,256 |
| | Herbáceo Arbustivo | 308,395 | 203,303 | 3,133 | 0,690 | 1,088 | 0,548 |
| | Lavoura Temporária | 37,722 | 20,763 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | Pastagem | 202,826 | 241,147 | 0,805 | 0,293 | 0,425 | 0,196 |
| Tipos de solo | Cambissolo Argissolo | 252,606 | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | Cambissolo Húmico | 60,812 | | 0 | 0,003 | 0 | 0,006 |
| | Argissolo VermelhoAmarelo | 62,546 | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | Neossolo Litólico Hístico | 1110,747 | | 21,643 | 11,932 | 1,435 | 1,105 |
| | Neossolo Litólico Húmico | 752,524 | | 5,771 | 13,817 | 0,565 | 1,889 |

| | | | | | | |
|---------------------------------|--|---------|--------|-------|--------------|--------------|
| Orientação das vertentes | Plano ($< 1^\circ$) | 6,040 | 0,025 | 0,074 | 0,366 | 1,058 |
| | Norte ($0^\circ - 22,5^\circ$; $337,5^\circ - 360^\circ$) | 293,488 | 10,168 | 9,896 | 3,120 | 2,914 |
| | Nordeste ($22,5^\circ - 67,5^\circ$) | 442,341 | 9,918 | 8,546 | 2,019 | 1,669 |
| | Leste ($67,5^\circ - 112,5^\circ$) | 314,635 | 2,847 | 3,396 | 0,815 | 0,933 |
| | Sudeste ($122,5^\circ - 157,5^\circ$) | 287,992 | 1,092 | 0,893 | 0,341 | 0,268 |
| | Sul ($157,5^\circ - 202,5^\circ$) | 426,934 | 0,718 | 0,398 | 0,152 | 0,080 |
| | Sudoeste ($202,5^\circ - 247,5^\circ$) | 273,233 | 0,226 | 0,168 | 0,074 | 0,053 |
| | Oeste ($247,5^\circ - 292,5^\circ$) | 91,865 | 0,577 | 0,507 | 0,566 | 0,477 |
| | Noroeste ($292,5^\circ - 337,5^\circ$) | 108,747 | 1,866 | 1,948 | 1,545 | 1,548 |

Tabela 1 – Densidade normalizadas para cada classe dos fatores.

Fonte: Autores (2021).

Os fatores reclassificados pela densidade de escorregamentos de 1957, com base nos valores em destaque na coluna 'Dn' da Tabela 1, podem ser visualizados na Figura 4.



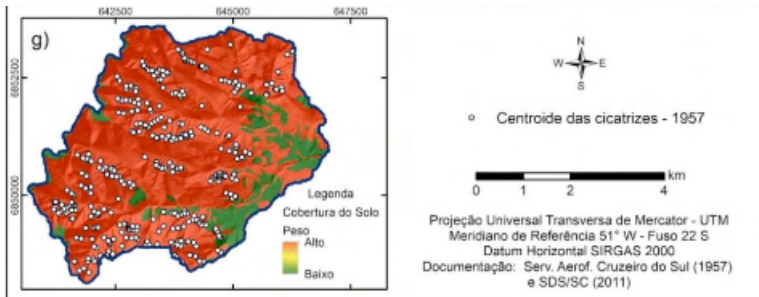


Figura 4 – Fatores predisponentes reclassificados pela densidade de escorregamentos (1957).

Fonte: Autores (2021).

É importante mencionar que não é apenas a localização da cicatriz de escorregamento que orienta o peso recebido por determinada classe de cada fator, reclassificada individualmente de baixa a alta suscetibilidade. O considerado no cálculo é a área incidente, contudo, para representação optou-se por demonstrar somente o ponto central da cicatriz, não seu polígono, sendo este melhor visualizado no mapa final de suscetibilidade aos escorregamentos (Figura 5), com base na associação dos fatores reclassificados da Figura 4 e hierarquizados pelos pesos da Equação (1).

O resultado do modelo de restituição para 1957 exprime que parte antropizada da sub-bacia, a planície próxima da confluência dos rios Mãe Luzia e Congonhas, possui baixa suscetibilidade aos escorregamentos, assim como o bordo de planalto à esquerda da área, não sendo identificadas cicatrizes de eventos antigos nestas áreas. Da mesma forma, a classe de média suscetibilidade aos escorregamentos apresenta poucas cicatrizes, estando estas muito concentradas nas classes alta e, principalmente, muito alta.

Acerca dos quantitativos das classes restituídas para 1957, Tabela 2, cerca de 40 % da área está em local de muito baixa e baixa suscetibilidade, um resultado significativo para o relevo movimentado daquele contexto espacial. Já a classe de muito alta suscetibilidade reuniu apenas 257,9 hectares, ou 11,5 % da área de estudo, entretanto, com muitas cicatrizes incidentes, o que corrobora o bom resultado visual de coincidência de cicatrizes em classes restituídas e com maior suscetibilidade, Figura 5.

| Classe | Área (ha) | % |
|-------------|---------------|------------|
| Muito Baixa | 454,1 | 20,3 |
| Baixa | 439,1 | 19,6 |
| Média | 316,3 | 14,1 |
| Alta | 771,4 | 34,5 |
| Muito Alta | 257,9 | 11,5 |
| Soma | 2238,7 | 100 |

Tabela 2 – Quantificação das áreas das classes de suscetibilidade obtidas pelo modelo restituído de 1957.

Fonte: Autores (2021).

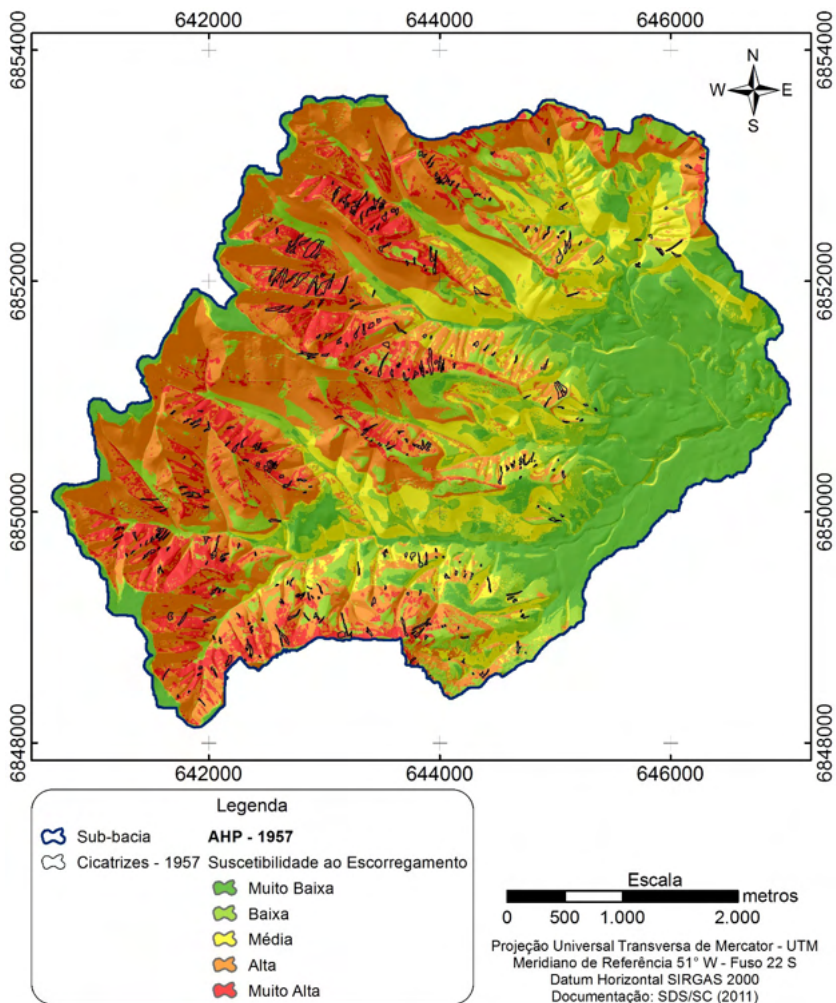


Figura 5 – Mapa final do modelo restituído para 1957.

Fonte: Autores (2021).

A exemplo do restituído para 1957, fez-se a aplicação para 1978. A hierarquia dentre os fatores seguiu o estabelecido pela Equação 1, oriunda da já explicitada participação e julgamentos de especialistas aplicada por Sant Ana (2021) e o mapa final para o evento restituído de 1978 segue apresentado na Figura 7. O quantitativo das classes de suscetibilidade, Tabela 3, apresenta 145,8 hectares como de muito alta propensão aos escorregamentos, ou seja, apenas 6,5% da área. A Figura 7 evidencia-se coincidência de cicatrizes com o zoneamento restituído.

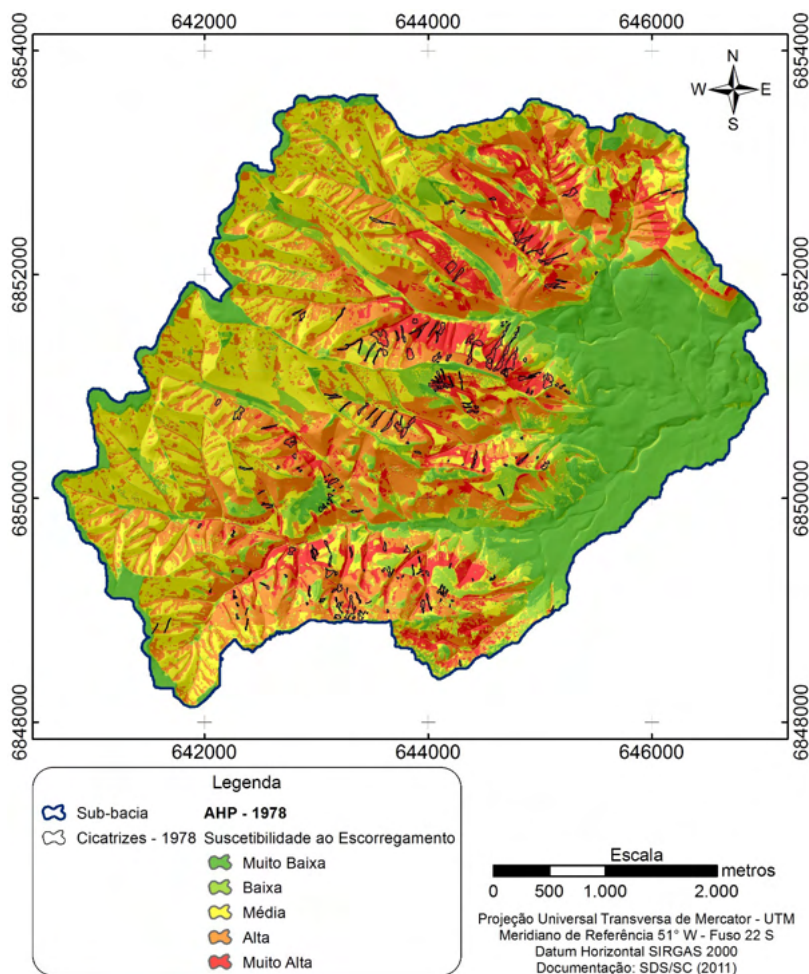


Figura 7 – Mapa final do modelo restituído para 1978.

Fonte: Autores (2021).

Feitas as considerações sobre os modelos preditivos aos escorregamentos na área de estudo, seguiu-se com a validação dos modelos restituídos, salientando-se, de

antemão, que já era esperado maior sensibilidade e especificidade destes modelos, uma vez que as próprias estatísticas de incidência dos escorregamentos foram informações de entrada para espacialização das classes de suscetibilidade. As Tabelas 4 e 5 apresentam os cálculos para IA e IE de 1957 e 1978, respectivamente.

| Classe | Área (ha) | % |
|-------------|---------------|------------|
| Muito Baixa | 469,6 | 21 |
| Baixa | 288,3 | 12,9 |
| Média | 612,2 | 27,3 |
| Alta | 722,5 | 32,3 |
| Muito Alta | 145,8 | 6,5 |
| Soma | 2238,6 | 100 |

Tabela 3 – Quantificação das áreas das classes de suscetibilidade obtidas pelo modelo restituído de 1978.

Fonte: Autores (2021).

| Classe | Área (ha) | % | Cicatrizes (m ²) | IA | IE |
|--------------|---------------|------------|------------------------------|------------|------------|
| Muito Baixa | 454,1 | 20,3 | 1.293 | 0,5 | 28,4 |
| Baixa | 439,1 | 19,6 | 31.135 | 11,4 | 21,3 |
| Média | 316,3 | 14,1 | 22.954 | 8,4 | 11,7 |
| Alta | 771,4 | 34,5 | 90.544 | 33,0 | 25,9 |
| Muito Alta | 257,9 | 11,5 | 128.184 | 46,8 | 12,7 |
| Total | 2238,7 | 100 | 274.110 | 100 | 100 |

Tabela 4 – Índices de Acerto e de Erro para as classes de suscetibilidade do modelo restituído de 1957.

Fonte: Autores (2021).

| Classe | Área (ha) | % | Cicatrizes (m ²) | IA | IE |
|--------------|---------------|------------|------------------------------|------------|------------|
| Muito Baixa | 469,6 | 21 | 3.143 | 1,2 | 29,3 |
| Baixa | 288,3 | 12,9 | 14.614 | 5,7 | 13,9 |
| Média | 612,2 | 27,3 | 29.588 | 11,5 | 21,4 |
| Alta | 722,5 | 32,3 | 105.612 | 41 | 28,2 |
| Muito Alta | 145,8 | 6,5 | 104.552 | 40,6 | 7,2 |
| Total | 2238,6 | 100 | 257.509 | 100 | 100 |

Tabela 5 – Índices de Acerto e de Erro para as classes de suscetibilidade do modelo restituído de 1978.

Fonte: Autores (2021).

Com os dados cumulativos dos IA e IE calculados pela intersecção das respectivas

cicatrizes sobre as classes de suscetibilidade, pôde-se representar as curvas ROC para os modelos de restituição obtidos pela análise multicritério, Figura 8. O pronunciado afastamento das curvas obtidas em relação à linha de referência, com a inflexão para o canto superior esquerdo do espaço ROC exprime modelos sensíveis e específicos.

O modelo de 1978 apresenta AUC 0,8 e o de 1957 0,78, Tabela 6, o que significa dizer que 80% das áreas modeladas como de alta suscetibilidade aos escorregamentos foram restituídas adequadamente.

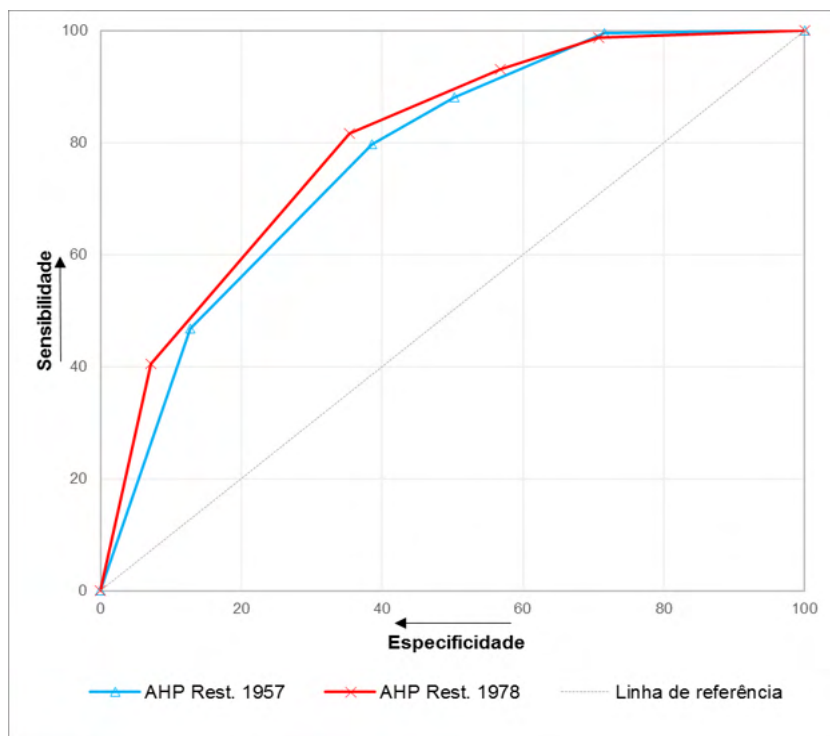


Figura 8 – Curvas ROC para modelos de restituição obtidos pela AHP.

Fonte: Autores (2021).

| 1957 | | | 1978 | | |
|-------|-------|---------|-------|-------|---------|
| Y | X | Área | Y | X | Área |
| 0 | 0 | | 0 | 0 | |
| 46,76 | 12,72 | 297,48 | 40,60 | 7,21 | 146,31 |
| 79,80 | 38,58 | 1636,30 | 81,61 | 35,40 | 1722,85 |
| 88,17 | 50,32 | 985,76 | 93,10 | 56,80 | 1869,77 |
| 99,5 | 71,6 | 1994,5 | 98,8 | 70,7 | 1332,7 |
| 100 | 100 | 2836 | 100 | 100 | 2913 |
| Soma | | 7750,26 | Soma | | 7984,29 |

Tabela 6 – Cálculo a AUC a partir das curvas ROC para os modelos de restituição.

Fonte: Autores (2021).

Esta constatação, da boa restituição realizada com o uso de estatísticas de incidência de cicatrizes como parâmetro de entrada para modelagem, valida um esforço deste trabalho: de efetuar-se modelos de restituição que representassem fielmente eventos passados, na tentativa de entendê-los e auxiliar a validar os modelos preditivos.

4 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, ao se estabelecer estas relações de densidade de escorregamentos pretéritos por classes temáticas de cada fator, assumiu-se que o passado é a chave para que se compreenda os escorregamentos futuros. As restituições multitemporais forneceram recursos para se compreender e comparar eventos de diferentes datas, empregar e validar diferentes métodos de mapeamento da suscetibilidade aos escorregamentos e de servir para treinamento de modelos preditivos.

As coincidências espaciais entre as maiores cicatrizes de escorregamentos e as classes restituídas nos modelos, como de muito alta suscetibilidade, reforçou, visualmente, que os modelos de restituição responderam adequadamente ao seu propósito. Contudo, salienta-se que, viu-se claramente que os eventos registrados para 1957 diferem em muito daqueles registrados nas fotografias de 1978, ou seja, ocorreram em setores distintos das vertentes.

Pela recorrência de um evento de alta magnitude em menos de 20 anos (57-78), constata-se que esse intervalo temporal não foi o suficiente para que haja formação de manto de intemperismo passível de escorregar. Isso é visível porque as áreas fonte são distintas nos eventos restituídos, ou seja, um episódio pluvial intenso significa escorregamentos em locais há muito sem registros de escorregamentos, ou ainda que não escorregaram, para o local não há recorrência espacial em apenas duas décadas.

Em relação à validação dos modelos aplicados, pelos Índices de Acerto e Erro,

ou seja, pela coincidência espacial de antigas cicatrizes com o zoneamento obtido nas diferentes aplicações, esta ofertou subsídio para averiguar o desempenho do modelo, pela análise de sensibilidade/especificidade, possível pelas curvas ROC. Os modelos restituídos resultaram em curvas acima da linha de referência, representando boa capacidade discriminante. Neste trabalho, foi verificado que a curva ROC é um excelente recurso para comparar a previsibilidade deste mapa resultante da modelagem.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais da Universidade do Extremo Sul Catarinense (PPGCA – UNESC) com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo auxílio financeiro fornecido ao 1º autor.

REFERÊNCIAS

AKGUN, A. A comparison of landslide susceptibility maps produced by logistic regression, multi-criteria decision, and likelihood ratio methods: a case study at İzmir, Turkey. **Landslides**, v. 9, p. 93–106, 2012.

ASSUNÇÃO, V. K. Enchente de 1974 como drama social: relações entre percepção de risco, conflito e gentrificação. **Ambiente & Sociedade**, v. XVII, n. 4, p. 195-212, 2014.

BAHRAMI, S.; RAHIMZADEH, B.; KHALEGHI, S. Analyzing the effects of tectonic and lithology on the occurrence of landslide along Zagros ophiolitic suture: a case study of Sarv-Abad, Kurdistan, Iran. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v.79, p. 1619-1637, 2019.

BRITO, J. L. N. S.; COELHO FILHO, L. C. T. **Fotogrametria digital**. 2ª edição. Rio de Janeiro: EdUERJ, 2007.

BRITO, M. M. de; WEBER, E. J.; PASSUELO, A. Avaliação multicritério aplicada ao mapeamento a suscetibilidade a escorregamentos: o caso do Bairro Cascata, Porto Alegre, RS. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 10, n. 3, p. 735 – 749, 2017.

DAI, F. C.; LEE, C. F. Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong. **Geomorphology**, v. 42, p. 213-228, 2002.

DEL SOLDATO, M.; RIQUELME, A.; BIANCHINI, S.; TOMÀS, R.; DI MARTIRE, D.; DE VITA, P.; MORETTI, S.; CALCATERRA, D. Multisource data integration to investigate one century of evolution for the Agnone landslide (Molise, southern Italy). **Landslides**, v. 15, p. 2113–2128, 2018.

DENG, X.; LI, L.; TAN, Y. Validation of spacial prediction models for landslides susceptibility by considering structural similarity. **International Journal of Geo-Information**, v. 6, n. 103, p. 1-16, 2017.

E-FOTO: Uma Estação Fotogramétrica Digital Educacional Livre. Disponível em: <<http://www.efoto.eng.uerj.br/>> Acesso em: 26 de fevereiro de 2019.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Levantamento de Reconhecimento dos Solos do Estado de Santa Catarina**. Escala 1:250.000, 1998.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília, Embrapa, 1999.

EPAGRI - EMPRESA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA E EXTENSÃO RURAL DE SANTA CATARINA. **Zoneamento Agroecológico e Socioeconômico do Estado de Santa Catarina**. 1999. CD-ROM.

ESRI. **Curvature Function**. Disponível em: <<http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/curvature-function.htm>> Acesso 27 Agosto. 2018.

FELL, R.; COROMINAS, J.; BONNARD, C.; CASCINI, L.; LEROI, E.; SAVAGE, W. Z. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land-use planning, **Engineering Geology**, v. 102, p. 99-111, 2008.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Manual técnico de uso da terra**. 3. ed. Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: <<http://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv81615.pdf>>. Acesso em: 14 mar. 2018.

IPT - INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Cartas de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundações - 1:25.000**: nota técnica explicativa. São Paulo: IPT, 2014.

KOMAC, M. A landslide susceptibility model using the Analytical Hierarchy Process method and multivariate statistics in perialpine Slovenia. **Geomorphology**. v. 74, n. 1-4, p.17-28, 2006.

KREBS, A. S. J. **Contribuição ao Conhecimento dos Recursos Hídricos Subterrâneos da Bacia Hidrográfica do Rio Araranguá, SC**. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Florianópolis: UFSC, 2004.

LEROI, E., BONNARD, C., FELL, R., MCINNES, R. Risk assessment and management. In: HUNGR, O., FELL, R., COUTURE, R., EBERHARDT, E. (eds.), **Landslide Risk Management**. London: Taylor and Francis, 2005, p. 159–198.

LUDWIG, L.; MATTEDI, M. A. Dos desastres do desenvolvimento ao desenvolvimento dos desastres: a expressão territorial da vulnerabilidade. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 39, p. 23-42, 2016.

MAGALHÃES, I. A. L.; THIAGO, C. R. L.; AGRIZZI, D. V.; SANTOS, A. R. Uso de geotecnologias para mapeamento de áreas de risco de inundação em Guaçuí, ES: uma análise comparativa entre dois métodos. **Cadernos de Geociências**, v. 8, n. 2, 2011.

MATEUS, E. T. Calamidade pública em uma cidade submersa: a imprensa e a Enchente de 1974 (Tubarão – SC), **Revista Hydra**. v. 1, n. 2, p. 126-153, 2016.

NGUYEN, T. T. N.; LIU, C-C. A New Approach Using AHP to Generate Landslide Susceptibility Maps in the Chen-Yu-Lan Watershed, Taiwan. **Sensors**. v. 19, n. 3(505), p. 1-18, 2019.

PELLÉRIN, J. R. G. M.; DUARTE, G. M.; SCHEIBE, L. F.; MENDONÇA, M.; BUSS, M. D.; MONTEIRO, M. A. Timbé do Sul – Jacinto Machado: avaliação preliminar da extensão da catástrofe de 23-24/12/95. **Geosul**, v. 12, n. 23, p.71-86, 1997.

POURGHASEMI, H. R., GAYEN, A.; PARK, S.; LEE, C-W.; LEE, S. Assessment of Landslide-Prone Areas and Their Zonation Using Logistic Regression, LogitBoost, and NaïveBayes Machine-Learning Algorithms. **Sustainability**, v. 10, n. 3697, p. 1-23, 2018.

RAMALHO-FILHO, A.; BEEK, K. J. **Sistema de avaliação da aptidão agrícola das terras**. 3. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPS, 1995.

ROODPOSHTI, M. S.; ARYAL, J. PRADHAN, B. A Novel Rule-based Approach in Mapping Landslide Susceptibility. **Sensors**, v. 19, n. 10(2274), p. 1-20, 2019.

- SAATY, T. L. A. Scaling method for priorities in hierarchical structures. **Journal of the Mathematical Psychology**. n.15, p. 234-281, 1977.
- SAATY, T. L. **Método de análise hierárquica**. São Paulo: McGraw-Hill Pub. Co., 1991.
- SAITO, S. M.; FERREIRA, C. C.; SAUSEN, T. M.; HANSEN, M. A. F.; MARCELINO, I. O. P. V. Sistematização de ocorrências de desastres naturais na região Sul do Brasil. In: XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR (Natal-RN: 2009), Natal, INPE, **Anais...** 2009, p. 2333-2339.
- SANT ANA, W. O. **Análise Comparativa e integração de métodos para mapeamento de áreas suscetíveis a escorregamentos**. 2021. 143 f. Tese de Doutorado (Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais - PPGCA) Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC, Criciúma, 2021.
- SANTANA, W. O.; BACK, A. J.; MICHEL, G. P.; LADWIG, N. I.; DE CONTO, D. Geometrias e posicionamento espacial de antigas cicatrizes de escorregamentos em encostas nas cabeceiras do rio Mãe Luzia, Treviso – Santa Catarina, Brasil. **Ciência e Natura**. Santa Maria, v. 42, e104, 2020. DOI:10.5902/2179460X41558.
- SDS – SECRETARIA DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DE SANTA CATARINA. **Levantamento Aerofotogramétrico – Ortomosaico RGB: Município de Treviso. Escala 1:2.000**. 2011. Disponível em: < <http://sigsc.sds.sc.gov.br/download/index.jsp>.> Acesso em: 06 abr. 2018.
- SERVIÇOS AEROFOTOGRAFAMÉTRICOS CRUZEIRO DO SUL S.A. (Santa Catarina, SC). **Foto Aérea. Santa Catarina, 1957, nºs. 952, 954, 958 e 959**. Escala 1:25.000.
- SERVIÇOS AEROFOTOGRAFAMÉTRICOS CRUZEIRO DO SUL S.A. (Santa Catarina, SC). **Foto Aérea. Santa Catarina, 1978, nºs. 18.485, 18.486, 18.488, 23.049 e 23.051**. Escala 1:25.000.
- SILALAH, F. E. S.; ARIFIANI, Y.; HIDAYAT, F. Landslide susceptibility assessment using frequency ratio model in Bogor, West Java, Indonesia. **Geoscience Letters**, v.6, n. 10, p. 1-17, 2019.
- SORBINO, G.; SICA, C.; CASCINI, L. Susceptibility analysis of shallow landslides source areas using physically based models. **Natural Hazards**, v. 53, n. 2, p. 313-332, 2010.
- STARK, C. P.; GUZZETTI, F. Landslide rupture and the probability distribution of mobilized debris volumes. **Journal of Geophysical Research**, v. 114, p. 1-16, 2009.
- TORRES, F. S. D. M. **Carta de suscetibilidade a movimentos de massa e erosão do município de Ipojuca-PE**. 2014. 106 f. Dissertação (Mestrado) - Pós-Graduação em Engenharia Civil, Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2014.
- VAN DEN EECKHAUT, M.; HERVÁS, J.; JAEDICKE, C.; MALET, J. -P.; MONTANARELLA, L.; NADIM, F. Statistical modelling of Europe-wide landslide susceptibility using limited landslide inventory data. **Landslides**, v. 9, n. 1, p. 357-369, 2012.
- VERHOEVEN, G.; DONEUS, M. BRIESE, Ch.; VERMEULEN, F. Mapping by matching: a computer vision-based approach to fast and accurate georeferencing of archaeological aerial photographs. **Journal of Archaeological Science**, v. 39, p. 2060–2070, 2010.