UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE FILOSOFIA, LETRAS E CIÊNCIAS HUMANAS
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA FÍSICA
LINHA DE PESQUISA: PAISAGEM E PLANEJAMENTO AMBIENTAL

JOSÉ EDUARDO BONINI

Fragilidade ambiental a escorregamentos rasos:
análise comparativa entre modelos de bases heurística e estatística

Versão Corrigida

Dissertação de Mestrado

São Paulo
2020

JOSÉ EDUARDO BONINI

**Fragilidade ambiental a escorregamentos rasos:
análise comparativa entre modelos de bases heurística e estatística**

Versão Corrigida

Dissertação apresentada à Faculdade de Filosofia, Letras
e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Mestre em Ciências

Área de concentração: Geografia Física

Orientador: Prof. Dr. Jurandyr Luciano Sanches Ross

Coorientadora: Profa. Dra. Bianca Carvalho Vieira

São Paulo
2020

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catálogo na Publicação
Serviço de Biblioteca e Documentação
Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo

B715f Bonini, José Eduardo
Fragilidade ambiental a escorregamentos rasos:
análise comparativa entre modelos de bases heurística
e estatística / José Eduardo Bonini ; orientador
Jurandyr Luciano Sanches Ross. - São Paulo, 2020.
101 f.

Dissertação (Mestrado)- Faculdade de Filosofia,
Letras e Ciências Humanas da Universidade de São
Paulo. Departamento de Geografia. Área de
concentração: Geografia Física.

1. Geomorfologia. 2. Modelos. 3. Geomorfometria.
I. Ross, Jurandyr Luciano Sanches, orient. II.
Título.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE FILOSOFIA, LETRAS E CIÊNCIAS HUMANAS

ENTREGA DO EXEMPLAR CORRIGIDO DA DISSERTAÇÃO/TESE

Termo de Ciência e Concordância do (a) orientador (a)

Nome do (a) aluno (a): José Eduardo Bonini

Data da defesa: 19/11/2020

Nome do Prof. (a) orientador (a): Jurandyr Luciano Sanches Ross

Nos termos da legislação vigente, declaro **ESTAR CIENTE** do conteúdo deste **EXEMPLAR CORRIGIDO** elaborado em atenção às sugestões dos membros da comissão Julgadora na sessão de defesa do trabalho, manifestando-me **plenamente favorável** ao seu encaminhamento e publicação no **Portal Digital de Teses da USP**.

São Paulo, 15/01/2021

(Assinatura do (a) orientador (a))

Nome: BONINI, José Eduardo

Título: Fragilidade ambiental a escorregamentos rasos: análise comparativa entre modelos de bases heurística e estatística

Dissertação apresentada à Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Aprovado em:

Banca Examinadora

Prof. Dr. Carlos Valdir de Meneses Bateira

Instituição: Universidade do Porto (Porto, Portugal)

Julgamento: _____

Prof. Dr. Claudinei Taborda da Silveira

Instituição: Universidade Federal do Paraná

Julgamento: _____

Prof. Dr. Eduardo Soares de Macedo

Instituição: Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT-SP)

Julgamento: _____

AGRADECIMENTOS

Agradecer a todos que de alguma forma me auxiliaram a realizar essa pesquisa, principalmente durante as etapas finais em meio a pandemia do novo coronavírus, com certeza consumiria mais páginas do que o próprio trabalho final possui. Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo financiamento desta pesquisa de Mestrado, sem o qual não teria sido possível a sua realização. Também agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Geografia Física da Universidade de São Paulo (PPGF-USP), cujos professores, funcionários e colegas sempre se mostraram disponíveis para me auxiliar.

Agradeço ao meu orientador, o Prof. Jurandyr Luciano Sanches Ross, por ter aceitado me orientar e auxiliado com sua experiência em todos os momentos em que precisei, inclusive me acompanhando nos trabalhos de campo em São Luiz do Paraitinga (SP). Também foi indispensável o apoio da coorientadora desta pesquisa, a Profa. Bianca Carvalho Vieira, que me deixou fascinado com a ciência geomorfológica desde que fui seu aluno de Geomorfologia II em 2016, ainda durante a graduação em Geografia. Se hoje estou mais próximo de me considerar como um cientista, sem dúvida foi por causa de todos os seus incentivos, correções e amizade.

Devo agradecer também aos colegas do PPGF Evandro Daniel e Marcelo de Almeida Balbino pelo auxílio nos trabalhos de campo e conversas. Agradeço também aos colegas do Grupo de Pesquisa de Processos Morfodinâmicos e Ambientais (GPmorfo), especialmente à Rebeca Durço Coelho, por todas as conversas no Laboratório de Geomorfologia da USP. Meu agradecimento também ao Prof. Fernando Nadal Junqueira Villela, cuja disciplina, trabalho de campo e discussões expandiram muito minha compreensão dos processos geomórficos em ambientes tropicais.

Agradeço ao Prof. Carlos Henrique Grohmann de Carvalho, do Instituto de Energia e Ambiente (IEE-USP), pelos apontamentos cuidadosos feitos no exame de qualificação e pelos dados de elevação cedidos para utilização nesta pesquisa, que muito melhoraram a qualidade do trabalho final. Agradeço também ao Prof. Carlos Valdir de Meneses Bateira (Universidade do Porto - Portugal) pelos comentários enriquecedores no exame de qualificação e por estar sempre disposto a esclarecer qualquer dúvida que eventualmente surgisse.

Também agradeço ao Prof. Tiago Damas Martins (UNIFESP) pelo apoio na elaboração de trabalhos científicos e em outros momentos do Mestrado (e antes dele), que muito enriqueceram a experiência que foi a realização desta pesquisa.

Agradeço aos meus queridos amigos Matheus, Gustavo, Gabriela, Ananda e Vânia que sempre suportaram minhas divagações sobre geomorfologia sem ~~muchas~~ reclamações. Vocês foram fundamentais para que eu conseguisse continuar e fazem muita falta. Estou ansioso pelo momento em que possamos nos encontrar novamente.

Agradeço também ao meu namorado, João, que me acompanhou antes e durante o Mestrado e sempre esteve ao meu lado em todos os momentos. Seu companheirismo e amizade com certeza foram um dos principais incentivos para que eu continuasse perseguindo a ideia de me tornar um pesquisador, mesmo neste momento tão sombrio para a pesquisa científica em nosso país.

O apoio da minha mãe Jenny e meus irmãos João e Maira também foi fundamental em todos os aspectos possíveis para que eu conseguisse realizar essa pesquisa. Nada disso teria sido possível sem seu apoio incondicional e muito me entristece que a pandemia tenha nos roubado tantos momentos de convivência neste ano. Este trabalho é dedicado a eles e a meu pai, Antônio, que não teve a oportunidade de ver até onde cheguei.

Junho de 2020

Um dia de chuva é tão belo como um dia de sol.

Ambos existem, cada um como é.

Alberto Caeiro

RESUMO

BONINI, José Eduardo. Fragilidade ambiental a escorregamentos rasos: análise comparativa entre modelos de bases heurística e estatística. 2020. Dissertação (Mestrado em Geografia Física) – Departamento de Geografia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020.

A identificação das áreas potencialmente instáveis é um dos primeiros passos para mitigar os riscos associados a escorregamentos rasos, podendo ser realizada por modelos quantitativos (estatísticos ou determinísticos) ou qualitativos (heurístico diretos e indiretos). No Brasil, o modelo da fragilidade ambiental foi aplicado em diversas áreas para identificação de áreas propensas a movimentos de massa e erosão linear, sendo similar a um modelo heurístico indireto de suscetibilidade. Modelos estatísticos como o modelo bivariado do Valor Informativo também foram aplicados para identificação de áreas instáveis no Brasil, porém menos quando comparados com os modelos qualitativos, entre eles o da fragilidade ambiental. Verifica-se uma lacuna nos trabalhos que aplicaram o modelo da fragilidade ambiental quanto à validação utilizando técnicas quantitativas. Assim, o *objetivo* desta pesquisa foi avaliar a fragilidade a escorregamentos a partir da comparação entre modelos de bases heurística e estatística, utilizando técnicas quantitativas de validação, tendo como área de estudo três bacias hidrográficas em São Luiz do Paraitinga (SP). Esta área foi afetada por 186 escorregamentos rasos durante precipitação intensa no verão de 2009-2010. Para tal, foram aplicados o modelo do Valor Informativo e o modelo heurístico da fragilidade ambiental, adaptado para considerar o Potencial de Escorregamento para atribuição dos pesos às variáveis. Os cenários foram comparados em duas etapas: 1) quantificação do desempenho e da capacidade preditiva (Taxas de Sucesso e Predição e Curvas ROC); e 2) avaliação da similaridade dos padrões espaciais de fragilidade ambiental (Kappa de Cohen). Os cenários do modelo do Valor Informativo foram integrados por meio de funções de sobreposição de mapas por valor de célula mediano, máximo e mínimo e comparados com o cenário de base heurística. Os principais fatores condicionantes foram o ângulo das vertentes, o Índice Topográfico de Umidade e o tipo de uso da terra. Ambos os modelos possuem qualidade similar, com valores de área abaixo da curva da Taxa de Sucesso e da curva ROC iguais ou superiores a 0.89, indicando qualidade entre boa e excelente. Apesar disso, os padrões espaciais dos mapas apresentaram diferença de até 64% na classificação, com maior acordo entre os modelos na classificação das áreas de fragilidade ambiental muito baixa e muito alta. Conclui-se que ambos os modelos são adequados para identificar áreas potencialmente instáveis a escorregamentos rasos, identificando de forma similar as áreas de fragilidade muito alta e muito baixa.

Palavras-chave: Valor Informativo; Suscetibilidade; Fragilidade Ambiental; Vale do Paraíba do Sul.

ABSTRACT

BONINI, José Eduardo. Environmental fragility to shallow landslides: comparative analysis between heuristic and statistical models. Dissertação (Mestrado em Geografia Física) – Departamento de Geografia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020.

One of the first steps to mitigate risks associated with shallow landslides is the identification of potentially unstable areas, which can be performed using quantitative (deterministic or statistical) or qualitative (direct and indirect heuristic) models. In Brazil, the environmental fragility model has been applied in several areas for the identification of areas prone to landsliding and erosion, and can be considered similar to an indirect heuristic susceptibility model. Statistical models, such as the Information Value bivariate model, were also applied for the identification of areas prone to landsliding, but less when compared with qualitative models, including the environmental fragility model. There is a gap in the works that applied the environmental fragility model regarding validation using quantitative techniques. Thus, this research objective was to evaluate the environmental fragility to shallow landslides through the comparison of heuristic and statistical models, using quantitative validation techniques and in a study area comprising three drainage basins in São Luiz do Paraitinga (SP) municipality. This area was affected by 186 shallow landslides during intense rains in the 2009-2010 summer. The Information Value model and the heuristic environmental fragility model were applied, adapting the last one to consider the Landslide Potential for the weight's assignment to each variable. The scenarios were compared in two steps: 1) performance and predictive capacity quantification (Success and Prediction Rates and ROC Curves); and 2) evaluation of the similarity of spatial patterns of environmental fragility (Cohen's Kappa). The scenarios produced with the Information Value model were integrated using map overlay functions based on the median, maximum and minimum cell values and then compared with the scenario obtained using the heuristic model. The main conditioning factors were slope, Topographic Wetness Index and land use. Both models have similar quality, with values of Success Rates and area under the ROC curve equal to or higher than 0.89, indicating good to excellent performance. However, the maps have a difference of classification up to 64%, with higher agreement on the very low and very high environmental fragility classes. We conclude that both models are adequate for the identification of areas prone to shallow landslides, with higher levels of agreement for the very high and very low environmental fragility classes.

Keywords: Information Value; Susceptibility; Environmental Fragility Paraíba do Sul Valley

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: (A) Escorregamentos rasos deflagrados no verão de 2009-2010 em São Luiz do Paraitinga. Fonte: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT-SP).....	19
Figura 2: Exemplos de aplicação do modelo da fragilidade ambiental. (A) Mapa de fragilidade ambiental da APA Várzea do rio Tietê (Folha 1); (B) Mapa de fragilidade ambiental da UGRHI-22. Fonte: (A) FUNDAÇÃO FLORESTAL (2013); (B) TROMBETA et al. (2014).	26
Figura 3: Exemplos de aplicação do modelo do Valor Informativo. (A) Carta de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundações do município de São Luiz do Paraitinga (SP); (B) Carta de suscetibilidade a escorregamentos do município de Caraguatatuba (SP); (C) Carta de suscetibilidade a escorregamentos da bacia do rio Alto Gurutuba em Itaoca (Vale do Ribeira, SP). Fonte: (A) CPRM; IPT (2014); (B) DIAS et al. (2018); (C) BONINI (2017).	29
Figura 4: Exemplo de curva ROC produzido a partir de amostra de dados (ROCR.simple) do pacote ROCR do software estatístico R.	31
Figura 5: Exemplo de aplicação das Taxas de Sucesso e Predição e valores de Área Abaixo da Curva (AAC). Fonte: BONINI et al. (2019).	33
Figura 6: Mapa de localização das bacias no contexto do município de São Luiz do Paraitinga e a litoeestrutura predominante.....	36
Figura 7: Diagrama de roseta com o rumo do mergulho preferencial da foliação metamórfica no Planalto de Paraitinga-Paraibuna. Fonte: OLIVEIRA (2019).	37
Figura 8: Fotografias de trabalho de campo na área de estudo. (A) Pastagem em primeiro plano e fragmento de mata nativa ao fundo; (B) Pasto em relevo plano e nas vertentes. Fonte: GPmorfo.	38
Figura 9: Fotografias de trabalho de campo em São Luiz do Paraitinga. (A) Pasto com campo agrícola; (B) Área com uso misto de silvicultura e pasto.....	39
Figura 10: Precipitação entre os meses de novembro de 2008 e fevereiro de 2010. Fonte: Agencia Nacional de Águas.	40
Figura 11: Precipitação horária entre os 28/12/2009 e 01/01/2010. Fonte: INMET.....	41
Figura 12: Escorregamentos em vertentes do município de São Luiz do Paraitinga deflagrados no verão de 2009-2010. Fonte: IPT-SP	42
Figura 13: Escorregamento em vertente próxima à estrada no município de São Luiz do Paraitinga. Fonte: IPT-SP.....	42
Figura 14: Rompimentos de talude no núcleo urbano de São Luiz do Paraitinga devido ao evento do verão de 2009-2010. Fonte: IPT-SP.....	43
Figura 15: Centro histórico de São do Paraitinga após o evento dos dias 31/12/2009 e 01/01/2010. Ao centro, os escombros da igreja matriz atingida pela inundação. Fonte: IPT-SP.	43
Figura 16: Recorte do inventário de Oliveira et al. (2018) para a área de estudo.	44
Figura 17: Esquema da abordagem semiautomática para definição dos polígonos das cicatrizes de escorregamento.....	46
Figura 18: Fluxograma dos procedimentos para aplicação do modelo do Valor Informativo... ..	48
Figura 19: Funções álgebra de mapas por sobreposição por valor de célula mediano, máximo e mínimo. Organizado pelo autor.....	49
Figura 20: Escala para classificação do grau de fragilidade ambiental com base no Potencial de Escorregamento (PE) normalizado.....	51
Figura 21: Boxplot da distribuição das cicatrizes em função da área (m ²) e do ângulo da vertente (graus).....	53
Figura 22: Afloramento rochoso em área classificada como granitoide na estrada do ribeirão do Pinga, próximo a Catuçaba (São Luiz do Paraitinga). Fonte: GPmorfo.	54

Figura 23: <i>Boxplots</i> da distribuição de cicatrizes em função da área (m ²) e ângulo da vertente (graus) por litotipo e mapa geológico	55
Figura 24: Mapa de ângulo das vertentes.....	58
Figura 25: Mapa de orientação das vertentes	59
Figura 26: Mapa de Índice Topográfico de Umidade (TWI)	61
Figura 27: Mapa de curvatura geral (planta/perfil) das vertentes	62
Figura 28: Mapa de litotipos (1:100.000)	64
Figura 29: Mapa de uso da terra.....	65
Figura 30: Curva ROC computada para o modelo heurístico	69
Figura 31: Taxa de sucesso computada para o modelo heurístico.	70
Figura 32: Detalhe dos cenários de fragilidade ambiental produzidos. (A) Cenário obtido a partir do modelo heurístico; (B) Cenário VI-P1 do modelo do Valor Informativo; (C) Cenário VI-P2; (D) Cenário VI-P3	74
Figura 33: Mapa de fragilidade ambiental de base heurística	78
Figura 34: Mapa de fragilidade ambiental de base estatística (função de sobreposição por mediana)	80
Figura 35: Mapa de fragilidade ambiental de base estatística (função de sobreposição por valor máximo)	82
Figura 36: Mapa de fragilidade ambiental de base estatística (função de sobreposição por valor mínimo)	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: – Exemplos de fatores condicionantes e relevância para análises de suscetibilidade a escorregamentos rasos.....	20
Tabela 2 – Métodos qualitativos e quantitativos para avaliação de suscetibilidade e suas escalas de aplicação recomendadas.....	23
Tabela 3 - Exemplo de pesos atribuídos a classes de declividade conforme a proposta original de Ross (1994).....	25
Tabela 4 – Exemplo esquemático de matriz de contingência.....	31
Tabela 5 – Nível de qualidade de um cenário a partir de valores de área abaixo da curva ROC.....	32
Tabela 6 -Escala de acordo a partir do índice Kappa proposta por Landis e Koch (1977). Traduzido e adaptado de Landis e Koch (1977).....	34
Tabela 7 – Valor Informativo de cada classe de cada parâmetro	57
Tabela 8 - Área abaixo da Curva ROC e Taxa de Sucesso e Predição para os cenários do modelo do Valor Informativo.....	66
Tabela 9 - Potencial de Escorregamento e valores de fragilidade ambiental do modelo heurístico.	68
Tabela 10: Índice Kappa calculado individualmente para cada classe de fragilidade e para cada combinação de cenários	75
Tabela 11: Área afetada por cicatrizes e área total das classes de fragilidade do cenário heurístico e dos cenários estatísticos integrados	77

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1 Movimentos gravitacionais de massa.....	18
2.2 Modelos de identificação da suscetibilidade	22
2.2.1 Fragilidade ambiental	24
2.2.2. Modelo do Valor Informativo	27
2.3 Técnicas estatísticas de validação	29
3. ÁREA DE ESTUDO	34
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	44
4.1 Dados de entrada para os modelos	44
4.1.1 <i>Inventário de cicatrizes</i>	<i>44</i>
4.1.2 <i>Fatores condicionantes</i>	<i>46</i>
4.2 Aplicação do Modelo do Valor Informativo	48
4.3 Aplicação do modelo heurístico de fragilidade ambiental	50
4.4 Validação.....	51
4.4.1 <i>Desempenho e capacidade preditiva.....</i>	<i>51</i>
4.4.2 <i>Similaridade espacial dos padrões de fragilidade ambiental</i>	<i>52</i>
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
5.1 <i>Condicionantes e Características das cicatrizes.....</i>	<i>52</i>
5.2 <i>Cenários do modelo do Valor Informativo</i>	<i>56</i>
5.3 <i>Cenário do modelo heurístico</i>	<i>66</i>
5.4 <i>Comparação entre os modelos.....</i>	<i>70</i>
5.4.1 <i>Similaridade espacial.....</i>	<i>75</i>
5.4.2 <i>Mapas de fragilidade heurísticos e cenários estatísticos integrados.....</i>	<i>76</i>
5.4.2.1 <i>Mapa final: Modelo heurístico.....</i>	<i>76</i>
5.4.2.2 <i>Mapa final: função de integração por mediana.....</i>	<i>79</i>
5.4.2.3 <i>Mapa final: função de integração por máximo</i>	<i>81</i>
5.4.2.4 <i>Mapa final: função de integração por mínimo</i>	<i>83</i>
CONCLUSÕES	85
REFERÊNCIAS	86

1. INTRODUÇÃO

Os movimentos de massa são processos naturais que podem representar perigo a populações e infraestruturas, sendo que 17% das mortes registradas devido a desastres naturais no mundo estão associados a estes processos (LACASSE; NADIM; KALSNES, 2009; FROUDE; PETLEY, 2018). No Brasil, os escorregamentos rasos estão entre os tipos de movimento de massa que mais causam mortes e prejuízos econômicos (ALHEIROS; AUGUSTO FILHO, 2010), com maior concentração de registros no sul e sudeste do país (MEIS; SILVA, 1968; BARATA, 1969; PETRI; SUGUIO, 1971; CRUZ, 1974; DE PLOEY; CRUZ, 1979; GOMES; GRAMANI, 2010; KOBİYAMA et al., 2010; COELHO NETTO et al., 2011; MICHEL; KOBİYAMA; GOERL, 2014; GRAMANI, 2015; FOLADOR; SILVEIRA; FIORI, 2018; POZZOBON; SILVEIRA; CURCIO, 2019).

O primeiro passo para contribuir com a redução e mitigação dos riscos associados a escorregamentos é avaliação da suscetibilidade por meio sobretudo do seu mapeamento (ALCÁNTARA-AYALA, 2002; OLIVEIRA et al., 2017). A suscetibilidade pode ser definida como a propensão natural do terreno a ocorrência de determinado tipo de processo, correspondendo à sua probabilidade espacial de ocorrência (BRABB, 1984; GUZZETTI et al., 1999; VAN WESTEN; VAN ASCH; SOETERS, 2006; PETSCHKO et al., 2014; YAMAGISHI, 2017; REICHENBACH et al., 2018). O mapa de suscetibilidade pode ser produzido a partir de diferentes modelos, divididos entre modelos quantitativos e qualitativos, diretos ou indiretos (SOETERS; VAN WESTEN, 1996; ALEOTTI; CHOWDHURY, 1999; GUZZETTI et al., 1999; VAN WESTEN, 2004; VAN WESTEN; VAN ASCH; SOETERS, 2006; COROMINAS et al., 2014).

Os modelos quantitativos são sempre indiretos e buscam produzir estimativas da probabilidade de ocorrência de determinado processo, podendo ser classificados como modelos determinísticos ou estatísticos (VAN WESTEN, 1993; ALEOTTI; CHOWDHURY, 1999; GUZZETTI et al., 1999; VAN WESTEN; CASTELLANOS; KURIAKOSE, 2008; COROMINAS et al., 2014). Modelos determinísticos podem combinar equações matemáticas de estabilidade e modelos hidrológicos para descrever as relações entre as componentes de um sistema físico, necessitando de dados geotécnicos detalhados para serem aplicados (SOETERS; VAN WESTEN, 1996; GRUBER; HUGGEL; PIKE, 2009; COROMINAS et al., 2014; CHAE et al., 2017).

Modelos estatísticos indicam áreas potencialmente instáveis combinando fatores condicionantes com a distribuição das ocorrências dos processos, neste caso os escorregamentos, assumindo, portanto, que as condições que levaram às rupturas no passado são as mesmas que condicionarão as rupturas futuras (CARRARA et al., 1991; SOETERS; VAN WESTEN, 1996; ALEOTTI; CHOWDHURY, 1999; GUZZETTI et al., 1999; COROMINAS et al., 2014; PETSCHKO et al., 2014; CHAE et al., 2017; ZÊZERE et al., 2017; REICHENBACH et al., 2018; STEGER; KOFLER, 2019).

Estes modelos podem ser *bivariados*, combinando cada fator com a distribuição de cicatrizes para calcular valores de ponderação, ou *multivariados*, que analisam as relações entre a variável dependente (os escorregamentos) e as variáveis independentes (fatores condicionantes) considerando relações entre elas (ALEOTTI; CHOWDHURY, 1999; GUZZETTI et al., 1999; AYALEW; YAMAGISHI, 2005; CHAE et al., 2017). Os modelos estatísticos são considerados na literatura como o padrão para mapeamentos de suscetibilidade em escala regional (1:25.000 a 1:250.000) (SOETERS; VAN WESTEN, 1996; VAN WESTEN; VAN ASCH; SOETERS, 2006; COROMINAS et al., 2014).

Os **modelos qualitativos** podem ser heurísticos diretos ou indiretos, resultando em mapas que representam a suscetibilidade de maneira descritiva (SOETERS; VAN WESTEN, 1996; ALEOTTI; CHOWDHURY, 1999; GUZZETTI et al., 1999; CASTELLANOS ABELLA; VAN WESTEN, 2008). O modelo heurístico direto consiste no mapeamento em campo da suscetibilidade, realizado com base na interpretação de um especialista ou de uma equipe de especialistas sobre a relação entre as instabilidades observadas e os aspectos ambientais da área. Os modelos heurísticos indiretos selecionam características ambientais consideradas como condicionantes do processo, determinando pesos para cada variável com base na experiência do operador, com o mapa de suscetibilidade resultando da combinação destas variáveis (VAN WESTEN, 1993, 2004; BARREDO et al., 2000; CASTELLANOS ABELLA; VAN WESTEN, 2008).

Independentemente do modelo selecionado para a avaliação de suscetibilidade, a validação quantitativa é considerada na literatura como uma etapa indispensável (REMONDO et al., 2003; BEGUERÍA, 2006; GUZZETTI et al., 2006; FRATTINI; CROSTA; CARRARA, 2010; COROMINAS et al., 2014; PETSCHKO et al., 2014; STEGER et al., 2016). A validação permite estabelecer, de forma mais objetiva, o grau de qualidade e confiabilidade de um mapa (GUZZETTI et al., 2006; FRATTINI; CROSTA; CARRARA, 2010).

A fragilidade ambiental é um conceito proposto por Ross (1994) com base nas Unidades Ecodinâmicas de Tricart (1977), podendo ser definida como a suscetibilidade de um sistema natural a processos morfogenéticos que levam à desestabilização do estado de equilíbrio de um sistema natural, variando principalmente em função dos diferentes graus de proteção conferidos ao solo pelo uso da terra e cobertura vegetal (ROSS, 1990, 1994; KAWAKUBO et al., 2005). Além deste conceito, Ross (1994) propõe um modelo para avaliação da fragilidade ambiental dos ambientes naturais que pode ser considerado similar a uma análise heurística indireta de suscetibilidade.

No Brasil, o modelo da fragilidade ambiental proposto por Ross (1994) foi aplicado em escala regional e de bacia hidrográfica para identificação de áreas propensas a ocorrência de movimentos de massa e processos erosivos lineares em diversas áreas do país (ROSA; ROSS, 1999; SPÖRL; ROSS, 2004; DONHA; SOUZA; SUGAMOSTO, 2006; SPÖRL; CASTRO; LUCHIARI, 2011; MASSA; ROSS, 2012; PINESE JÚNIOR.; RODRIGUES, 2012; FUNDAÇÃO FLORESTAL, 2013; GOUVEIA et al., 2014; TROMBETA et al., 2014; CEARÁ, 2016).

No entanto, os trabalhos com o modelo da fragilidade ambiental não utilizaram as técnicas estatísticas mais comumente aplicadas na validação de modelos de suscetibilidade, como as curvas de ROC (*Receiver Operating Characteristics*) (BRADLEY, 1997; FAWCETT, 2006) e as Taxas de Sucesso e Predição (CHUNG; FABBRI, 1999, 2003), e não foram avaliados utilizando uma combinação de técnicas de validação, procedimento recomendado pois cada técnica ressalta um aspecto da relação entre o mapa e a distribuição real das ocorrências do processo (BEGUERÍA, 2006; FRATTINI; CROSTA; CARRARA, 2010; COROMINAS et al., 2014; ZÊZERE et al., 2017; REICHENBACH et al., 2018).

Uma vez que os mapas de fragilidade ambiental possuem finalidade similar à dos mapas de suscetibilidade, é necessário que os mapas de fragilidade ambiental passem por uma etapa de validação. Além de estabelecer o grau de qualidade do mapa, a etapa de validação também permite que os resultados do modelo da fragilidade ambiental sejam comparados com os resultados de outros modelos de forma mais objetiva (REMONDO et al., 2003; BEGUERÍA, 2006; GUZZETTI et al., 2006; FRATTINI; CROSTA; CARRARA, 2010), o que pode contribuir para a melhoria do modelo da fragilidade ambiental. Assim, o *objetivo* desta pesquisa foi avaliar a fragilidade a escorregamentos a partir da comparação entre modelos de bases heurística e estatística utilizando técnicas

quantitativas de validação. Como objetivo específico, buscou-se reduzir a subjetividade associada a seleção de pesos para as variáveis no modelo heurístico da fragilidade ambiental.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Movimentos gravitacionais de massa

Os movimentos de massa podem ser divididos em quatro grandes grupos: a) escorregamentos; b) corridas; c) quedas e tombamentos; e d) rastejo (SHARPE, 1938; AUGUSTO FILHO, 1992; BIERMAN; MONTGOMERY, 2014; HUNGR; LEROUEIL; PICARELLI, 2014). A classificação dos movimentos de massa leva em consideração a existência de planos de ruptura, o tipo de material mobilizado pelo processo, sua velocidade, modo de propagação da ruptura, informações sobre o material mobilizado e sobre a atividade do processo após a ruptura (CROZIER, 1986; SELBY, 1993; HUNGR; LEROUEIL; PICARELLI, 2014)

Dentre as tipologias de movimentos de massa destacadas, este trabalho foca nos escorregamentos *translacionais* ou *rasos* (**Figura 1**). Estes processos são definidos como movimentos de massa rápidos (velocidade de deslocamento em m/s) com superfície de ruptura planar frequentemente associada a uma descontinuidade entre solo e rocha e/ou entre camadas com permeabilidade fortemente distinta, mobilizando os materiais mais superficiais da vertente e deixando na paisagem cicatrizes alongadas e com larguras relativamente reduzidas (AUGUSTO FILHO, 1992; WOLLE; CARVALHO, 1994; HUNGR; LEROUEIL; PICARELLI, 2014).

Figura 1: Escorregamentos rasos deflagrados no verão de 2009-2010 em São Luiz do Paraitinga. Fonte: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT-SP).

É possível relacionar a ocorrência dos escorregamentos com aspectos ambientais considerados *fatores condicionantes* tais como características geológicas, morfométricas, geomorfológicas e hidrológicas das vertentes (**Tabela 1**). A seleção dos fatores condicionantes deve considerar as características da área de estudo, o tipo dos movimentos de massa analisados, a escala do mapeamento e a disponibilidade de dados (SOETERS; VAN WESTEN, 1996; GUZZETTI et al., 1999; COROMINAS et al., 2014). Os fatores condicionantes podem ser divididos ainda em duas categorias de acordo com sua variação ao longo do tempo: fatores estáticos, tais como características geológicas das vertentes; e fatores dinâmicos, como o uso da terra, implicando na necessidade de atualização mais frequente dos dados referentes a fatores dinâmicos (GLADE; CROZIER, 2005; VAN WESTEN; CASTELLANOS; KURIAKOSE, 2008).

Tabela 1: – Exemplos de fatores condicionantes e relevância para análises de suscetibilidade a escorregamentos rasos

TIPO DE FATOR	EXEMPLOS DE PARÂMETROS	RELEVÂNCIA PARA ANÁLISES DE SUSCETIBILIDADE
Topografia e morfometria	Elevação	Diferenças de elevação implicam em maior energia potencial para os escorregamentos
	<u>Ângulo da vertente</u>	Fator determinante sobre a ocorrência de escorregamentos
	<u>Orientação da vertente</u>	Pode implicar em variações de umidade e variações da vegetação, também com papel importante em relação a descontinuidades
	<u>Curvatura</u>	Indicador da hidrologia da vertente
Geológicos	Direção e acumulação de fluxo	Aplicadas na modelação hidrológica, por exemplo no cálculo do <u>Índice de Topográfico de Umidade</u>
	<u>Litotipos</u>	Determinam características geotécnicas das rochas
	Intemperismo	Tipos de intemperismo, grau de intemperismo, zonas individualizadas de intemperismo e idade dos cortes são características importantes
	Descontinuidades	Tipos e características de descontinuidades têm relação com a orientação e inclinação das vertentes
Solos	Aspectos estruturais	Relação entre as estruturas geológicas e o ângulo de inclinação e orientação das vertentes
	Lineamentos	Distância em relação às zonas de cisalhamento
	Profundidade do solo	A profundidade determina a quantidade potencial de material disponível para mobilização
	Propriedades geotécnicas	Tamanho dos grãos, coesão, ângulo de atrito interno, densidade, coesão etc.
Hidrologia	Propriedades hidrológicas	Quantidade e tipos de poros, condutividade hidráulica saturada etc.
	Profundidade do lençol	Variações espaciais e temporais na profundidade do lençol freático, formação de lençóis suspensos, frentes de saturação e poro-pressão são variáveis importantes
	Umidade do solo	Variações espaciais e temporais do conteúdo de umidade do solo
	Componentes hidrológicas	Interceptação da precipitação, evapotranspiração, fluxos superficiais, infiltração etc.
Geomorfologia	Rede de drenagem e densidade de drenagem	Em análises em escala pequena, a densidade de drenagem pode ser utilizada como um indicador de características do terreno
	Contexto geomorfológico	Tropical, glacial, costeiro etc.
	Movimentos de massa antigos	Características do terreno e dos materiais podem ter sido alteradas, favorecendo a reativação de escorregamentos antigos
	<u>Uso da terra atual</u>	Tipo de uso/coertura da terra, tipo de vegetação, dossel, profundidade das raízes, coesão fornecida pelas raízes, peso da vegetação
Uso da terra e fatores antrópicos	<u>Variações no uso da terra</u>	Variações do uso da terra no tempo podem influenciar a ocorrência de escorregamentos
	Construções	Cortes realizados para as construções
	Redes de irrigação e drenagem	Vazamentos nestas redes podem ser uma causa importante de escorregamentos
	Mineração	Altera a geometria e distribuição de tensões das vertentes, com as vibrações decorrentes de detonações podendo causar escorregamentos
	Reservatórios e barragens	Reservatórios podem alterar condições hidrológicas e barragens podem romper

Traduzido e adaptado de Corominas et al. (2014)

A orientação das vertentes (**Tabela 1**) se relaciona com os aspectos geométricos da vertente podendo ser considerada como uma variável de aproximação em relação a

características litoestruturais, tais como o rumo do mergulho de camadas do substrato, com tendência de aumento da estabilidade caso o mergulho esteja orientado para o interior da vertente (anaclinal) e de redução da estabilidade, caso o mergulho seja concordante ao da vertente (cataclinal) (SELBY, 1993; CAPITANI; RIBOLINI; BINI, 2014; ZÊZERE et al., 2017).

Corominas *et al.* (2014) indicaram o *ângulo da vertente* como fator predominante sobre a ocorrência de escorregamentos rasos, pois as tensões cisalhantes no material tendem a aumentar quanto maior o ângulo da vertente (BIERMAN; MONTGOMERY, 2014; MCCOLL, 2015). Alguns trabalhos no Brasil, sobretudo na Serra do Mar, apontaram que os escorregamentos rasos tendem a ocorrer em maior quantidade em vertentes com ângulos de inclinação entre 18° e 40°, com reduções na quantidade de cicatrizes em vertentes com inclinação superior a 40°, que costumam corresponder a afloramentos rochosos onde não há material suficiente para mobilização em um escorregamento (FERNANDES et al., 2004; BONINI et al., 2017, 2020; DIAS; DIAS; VIEIRA, 2017; MARTINS et al., 2017).

Outros fatores condicionantes podem ser obtidos pela combinação de parâmetros morfométricos, como o *Índice Topográfico de Umidade (TWI)* (**Equação 1**). Este índice relaciona a área de contribuição a montante (m²) (*A*) e o ângulo de inclinação (em radianos) (β) (BEVEN; KIRKBY, 1979). O TWI indica o controle topográfico sobre os processos hidrológicos de uma vertente, com valores elevados indicando áreas com maior tendência de acúmulo de água (por ex. fundos de vale) e valores reduzidos correspondendo às áreas que tendem a possuir menor tendência de acúmulo de água (por ex. os setores de alta vertente) (SEIBERT; STENDAHL; SØRENSEN, 2007; BRAGAGNOLO; SILVA; GRZYBOWSKI, 2020)

$$TWI = \ln \frac{A}{\tan \beta} \quad (1)$$

A *curvatura* exerce controle sobre a dinâmica hidrológica das vertentes com tendência de convergência dos fluxos de água em curvaturas côncavas e dispersão em curvaturas convexas (SELBY, 1993; MONTGOMERY; DIETRICH, 1994; BIERMAN; MONTGOMERY, 2014) (**Tabela 1**). Em função dessa concentração de fluxos subsuperficiais, as vertentes côncavas tendem a ser mais instáveis a escorregamentos rasos pois requerem menos precipitação para a deflagração do processo (GAO, 1993;

FERNANDES et al., 2001; VIEIRA, 2007; LISTO; CARVALHO VIEIRA, 2012; AFUNGANG; BATEIRA; NKWEMOH, 2017; DIAS; DIAS; VIEIRA, 2017; BRAGAGNOLO; SILVA; GRZYBOWSKI, 2020).

Destacam-se também os condicionantes litológicos que controlam as propriedades geotécnicas dos solos residuais e saprolitos (coesão, ângulo de atrito interno) (WOLLE et al., 1985; LACERDA, 2007). As estruturas da rocha matriz preservadas nos saprolitos influenciam o desenvolvimento de caminhos preferenciais para os fluxos subsuperficiais, favorecendo o surgimento de zonas de saturação e influenciando também o grau de intemperismo, que tende a ser maior ao longo destas discontinuidades (WOLLE et al., 1985; GERSCOVICH; VARGAS; CAMPOS, 2006).

O *uso da terra* identifica o tipo de atividade antrópica. Alguns destes tipos, associados às condições naturais do terreno, podem favorecer a instabilidade das vertentes, como cultivos agrícolas em vertentes íngremes (PEREIRA; ZÊZERE; BATEIRA, 2012; BATEIRA, 2015; OLIVEIRA et al., 2018). Por outro lado, determinados tipos de uso podem favorecer a estabilidade das vertentes, como as áreas com vegetação densa e complexo sistema radicular que pode aumentar a coesão aparente (GREENWAY, 1987; SCHMIDT et al., 2001; GUTHRIE, 2002; GUNS; VANACKER, 2014; GOETZ; GUTHRIE; BRENNING, 2015; PISANO et al., 2017).

Além dos fatores condicionantes, a ocorrência de escorregamentos está associada aos fatores externos, como as precipitações intensas e os terremotos chamados, neste caso, de *fatores deflagradores* (GLADE; CROZIER, 2005; VAN WESTEN; VAN ASCH; SOETERS, 2006; YAMAGISHI, 2017). No Brasil, a combinação de chuvas antecedentes sucedidas por eventos pluviométricos intensos é o principal fator deflagrador dos escorregamentos. Nesta situação a infiltração da água na vertente aumenta o peso do material e permite o desenvolvimento de poro-pressão positiva com consequente neutralização das forças de resistência ao cisalhamento, levando à ruptura (WOLLE; HACHICH, 1989; GERSCOVICH; VARGAS; CAMPOS, 2006).

2.2 Modelos de identificação da suscetibilidade

A seleção do modelo para a avaliação de suscetibilidade é diretamente relacionada à escala do mapeamento, que determina, em parte, quais os tipos de dados utilizados (COROMINAS et al., 2014). Os modelos heurísticos diretos e indiretos podem ser

aplicados em qualquer escala de análise (ALEOTTI; CHOWDHURY, 1999; VAN WESTEN; CASTELLANOS; KURIAKOSE, 2008) (**Tabela 2**), sendo que os modelos heurísticos diretos são menos recomendados para escalas pequenas em função de possíveis custos operacionais elevados, uma vez que a suscetibilidade deve ser mapeada diretamente em campo (SOETERS; VAN WESTEN, 1996; GUZZETTI et al., 1999). Os modelos heurísticos indiretos superam em parte tal limitação dos modelos diretos, mas possuem limitações de reprodutibilidade relacionadas à subjetividade na atribuição de pesos a cada fator condicionante, que dependem da experiência do operador do modelo (VAN WESTEN, 1993; SOETERS; VAN WESTEN, 1996; ALEOTTI; CHOWDHURY, 1999; CASTELLANOS ABELLA; VAN WESTEN, 2008; COROMINAS et al., 2014).

Tabela 2 – Métodos qualitativos e quantitativos para avaliação de suscetibilidade e suas escalas de aplicação recomendadas

	MÉTODO			
	Qualitativos		Quantitativos	
	Diretos	Indiretos	Estatísticos	Determinísticos
Escala nacional ($< 1:250.000$)	✓	✓	X	X
Escala regional ($1:25.000 - 1:250.000$)	✓	✓	✓	X
Escala local ($1:5.000 - 1:25.000$)	✓	✓	✓	✓
Escala detalhada ($> 1:5.000$)	✓	✓	X	✓

Traduzido e adaptado de Van Westen *et al.* (2008) e Corominas *et al.* (2014)

Modelos estatísticos são mais adequados para escalas regionais e locais (**Tabela 2**), sendo menos recomendados para estudos em escala nacional ($< 1:250.000$) e detalhada ($> 1: 5.000$) principalmente em função da grande quantidade de dados necessários para aplicação nestas escalas (SOETERS; VAN WESTEN, 1996; ALEOTTI; CHOWDHURY, 1999; COROMINAS et al., 2014). Apesar disso, trabalhos recentes foram capazes de gerar mapas de suscetibilidade em escala detalhada com boa qualidade, utilizando mapas geológicos detalhados, mapas de espessura dos solos e de grau de intemperismo (CIURLEO; CALVELLO; CASCINI, 2016; CIURLEO; CASCINI; CALVELLO, 2017; BORRELLI; CIURLEO; GULLÀ, 2018)

Os modelos determinísticos são mais adequados para estudos em escala local e detalhada (**Tabela 2**), não sendo recomendados para realização de mapeamentos em escalas menores, pois há a necessidade de conhecimento aprofundado de propriedades geotécnicas e hidrológicas, com grandes variações espaciais (GUZZETTI et al., 1999; VAN WESTEN; CASTELLANOS; KURIAKOSE, 2008; COROMINAS et al., 2014). A aplicação de modelos determinísticos para produção de mapas de escala pequena e em áreas com pouca disponibilidade de dados pode levar a uma simplificação excessiva do modelo e a resultados pouco realísticos (SOETERS; VAN WESTEN, 1996; ALEOTTI; CHOWDHURY, 1999; GUZZETTI et al., 1999).

2.2.1 Fragilidade ambiental

As avaliações de fragilidade ambiental são necessariamente análises integradas de fatores naturais e antrópicos, resultando em produtos-síntese que indicam a maior ou menor suscetibilidade das áreas mapeadas (ROSS, 1990, 1994). Estes produtos-síntese já foram utilizados para fins de ordenamento do território (FUNDAÇÃO FLORESTAL, 2013; CEARÁ, 2016), havendo também numerosos trabalhos que produziram mapas de fragilidade ambiental para diversas áreas do país (SPÖRL; ROSS, 2004; KAWAKUBO et al., 2005; FLORIANI et al., 2006; CAROU et al., 2014; CEREDA JUNIOR; RÖHM, 2014; GAYOSO, 2014; BACANI et al., 2015; GARÓFALO; FERREIRA, 2015; BARBOSA; SAKAMOTO; BACANI, 2016; SCHIAVO et al., 2016).

Os valores de ponderação de cada variável do modelo são definidos de acordo com o conhecimento do operador do modelo em uma escala que varia de *Fragilidade Ambiental Muito Fraca ou Baixa* (1) a *Fragilidade Ambiental Muito Forte ou Muito Alta* (5) (ROSS, 1994). Nesta proposta, a classificação dos mapas de fatores condicionantes é também realizada com base no conhecimento geomorfológico do operador do modelo, considerando os processos em análise. Cada classe de um fator condicionante recebe um valor nesta escala de acordo com seu grau de fragilidade, com a integração das camadas de informação resultando em um mapa síntese que expressa a fragilidade ambiental das unidades Ecodinâmicas em uma escala *qualitativa*, também de Muito Baixa a Muito Alta (**Tabela 3**).

Tabela 3 - Exemplo de pesos atribuídos a classes de declividade conforme a proposta original de Ross (1994)

Declividade (%)	Grau de fragilidade ambiental
Abaixo de 6	Muito baixa (1)
de 6 e 12	Baixa (2)
de 12 a 20	Moderada (3)
de 20 a 30	Alta (4)
Acima de 30	Muito Alta (5)

Fonte: Adaptado de Ross (1994).

Um exemplo de aplicação do modelo da fragilidade ambiental é o mapa produzido para o Plano de Manejo da Área de Preservação Ambiental (APA) da Várzea do Rio Tietê (FUNDAÇÃO FLORESTAL, 2013) (**Figura 2A**). O mapa de fragilidade foi produzido pela integração de mapas de fatores condicionantes (padrões de relevo; solos; ângulo das vertentes; e geologia) com pesos atribuídos a cada classe dos fatores de acordo com a proposta original de Ross (1994) (**Tabela 3**).

Outro exemplo de aplicação do modelo da fragilidade ambiental é o trabalho de Trombeta *et al.* (2014), que resultou em um mapa de fragilidade para toda a Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos 22 – Pontal do Paranapanema (UGRHI-22) (11871 km²) (**Figura 2B**). Os autores adaptaram os pesos sugeridos por Ross (1994) para os parâmetros selecionados (dissecação do relevo; impacto pluvial; tipos de solo; e uso da terra) e verificaram que mais da metade da UGRHI-22 possui fragilidade ambiental de média a alta a processos erosivos lineares (ravinas e voçorocas).

Dentre as adaptações do modelo de fragilidade ambiental para atribuição de pesos com base em técnicas quantitativas (SPÖRL, 2007; SPÖRL; CASTRO; LUCHIARI, 2011; GARÓFALO; FERREIRA, 2015), destaca-se o trabalho desenvolvido por Garófalo e Ferreira (2015) que produziu um mapa de fragilidade ambiental em escala de bacia hidrográfica para a APA Fernão Dias (MG). A partir de um inventário de cicatrizes de escorregamento e de erosão os autores determinaram os pesos de cada fator condicionante com base no valor *D* do teste estatístico não-paramétrico de Kolmogorov-Smirnov (TAYLOR, 1977).

Figura 2: Exemplos de aplicação do modelo da fragilidade ambiental. (A) Mapa de fragilidade ambiental da APA Várzea do rio Tietê (Folha 1); (B) Mapa de fragilidade ambiental da UGRHI-22. **Fonte:** (A) FUNDAÇÃO FLORESTAL (2013); (B) TROMBETA et al. (2014).

A principal diferença entre os mapeamentos de suscetibilidade e os de fragilidade ambiental consiste na consideração de mais de um processo em uma mesma análise,

avaliando a propensão a ocorrência de processos desde a erosão linear até os movimentos de massa. Neste trabalho, foi adotada a recomendação de **não** considerar processos diferentes na mesma análise (GUZZETTI et al., 1999; COROMINAS et al., 2014; REICHENBACH et al., 2018), pois diferentes processos possuem fatores condicionantes e deflagradores distintos. Optou-se por analisar somente a fragilidade ambiental a escorregamentos translacionais devido à grande quantidade de registros desses fenômenos na área de estudo.

2.2.2. Modelo do Valor Informativo

O modelo do Valor Informativo (VI) (YIN; YAN, 1988) é um modelo estatístico bivariado para determinação de pesos (VI_{ij}) com base na razão entre o número de unidades de mapeamento com cicatrizes em uma classe j de um parâmetro i (S_j) e o total de unidades de mapeamento da classe j do parâmetro i (N_j), em relação ao total de unidades de mapeamento com cicatrizes (S) e o total de unidades de mapeamento (N), conforme a **Equação 2**.

$$VI_{ij} = \ln \frac{S_j/N_j}{S/N} \quad (2)$$

Valores positivos de VI_{ij} indicam que a classe j de um parâmetro i favorece a instabilidade da vertente, de forma mais intensa quanto mais positivo for este valor. Valores negativos indicam que a classe j do parâmetro i não favorece a instabilidade, também mais intensamente quanto mais negativo o valor (YIN; YAN, 1988; PEREIRA; ZÊZERE; BATEIRA, 2012; ZÊZERE et al., 2017). Em casos em que a classe j do parâmetro i não possui nenhuma unidade de mapeamento afetada por cicatrizes, a Equação 2 não pode ser aplicada. Nestas situações, deve-se definir o Valor Informativo da classe como um número inteiro inferior ao menor Valor Informativo computado entre todas classes de todos os parâmetros (CIURLEO; CALVELLO; CASCINI, 2016). O Valor Informativo final de uma unidade de mapeamento j é obtido a partir da **Equação 3** e resulta da integração dos mapas de Valor Informativo para cada parâmetro i (YIN; YAN, 1988; PEREIRA; ZÊZERE; BATEIRA, 2012; CIURLEO; CALVELLO; CASCINI, 2016).

$$VI_j = \sum_{i=1}^m X_{ji} VI_{ij} \quad (3)$$

Em que VI_j é o Valor Informativo final de um parâmetro; e X_{ij} corresponde a zero ou a 1 para indicar se o parâmetro j está ou não na unidade de mapeamento j .

O modelo do Valor Informativo já foi aplicado para análises de suscetibilidade a escorregamentos em Portugal (ZÊZERE, 1997, 2002; PEREIRA; ZÊZERE; BATEIRA, 2012; HENRIQUES, 2014; BATEIRA, 2015; ZÊZERE et al., 2017), Índia (JADE; SARKAR, 1993) e Camarões (AFUNGANG; BATEIRA; NKWEMOH, 2017), gerando bons resultados inclusive em comparação com modelos mais complexos, como no estudo de Chen, Niu e Jia (2016) na região do rio Yangtze (China). No Brasil este modelo foi menos aplicado, com mapas de suscetibilidade produzidos para os municípios de Caraguatatuba (SP) (DIAS et al., 2018), Ouro Preto (MG) (XAVIER, 2018), para o sudeste do Estado de Minas Gerais (BARELLA; SOBREIRA; ZÊZERE, 2019) e mapas em escala de bacia hidrográfica no município de Itaoca (Vale do Ribeira) (BONINI, 2017; BONINI et al., 2019, 2020).

As cartas de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa produzidas por CPRM e IPT (2014) para municípios com alta suscetibilidade a estes processos são um exemplo de aplicação do modelo do Valor Informativo (**Figura 3A**). O modelo foi aplicado apenas para a análise de suscetibilidade a escorregamentos e validado utilizando uma técnica semelhante às Taxas de Sucesso e Predição (CHUNG; FABBRI, 1999, 2003).

Também com o recorte territorial do município, Dias *et al.* (2018) realizaram um mapeamento da suscetibilidade a escorregamentos em Caraguatatuba (Litoral Norte de São Paulo) (**Figura 3B**). Utilizando apenas quatro parâmetros morfométricos (elevação; ângulo; orientação; e curvatura), o modelo de suscetibilidade obtido por Dias *et al.* (2018) foi validado através da Taxa de Sucesso e apresentou desempenho considerado bom (78%).

Em escala de bacia hidrográfica, o modelo do Valor Informativo foi aplicado por Bonini (2017) em uma bacia de aproximadamente 4.5 km² e com 336 cicatrizes de escorregamento deflagrados em 2014 no município de Itaoca (Vale do Ribeira, SP) (**Figura 3C**). Utilizando sete parâmetros morfométricos (área de contribuição; curvatura; elevação; orientação; ângulo; e posição topográfica), os modelos produzidos apresentaram Taxa de Sucesso acima de 70% e Taxa de Predição entre 60 e 68%, indicando desempenho e capacidade preditiva razoáveis.

Figura 3: Exemplos de aplicação do modelo do Valor Informativo. (A) Carta de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundações do município de São Luiz do Paraitinga (SP); (B) Carta de suscetibilidade a escorregamentos do município de Caraguatatuba (SP); (C) Carta de suscetibilidade a escorregamentos da bacia do rio Alto Gurutuba em Itaoca (Vale do Ribeira, SP). **Fonte:** (A) CPRM; IPT (2014); (B) DIAS *et al.* (2018); (C) BONINI (2017).

2.3 Técnicas estatísticas de validação

Nas análises de suscetibilidade, a validação dos modelos é considerada uma etapa fundamental, pois permite determinar o quanto os resultados se adequam à realidade e

como as predições se alteram com variações nos dados de entrada. Recomenda-se a utilização de mais de uma métrica de validação estatística para analisar um modelo, pois cada técnica destaca um aspecto específico da relação entre a predição e o que foi observado no terreno (BEGUERÍA, 2006; GUZZETTI et al., 2006; FRATTINI; CROSTA; CARRARA, 2010; REICHENBACH et al., 2018).

Dentre as técnicas de validação, destacam-se aquelas independentes de classificação por permitirem a avaliação do desempenho e acurácia do modelo para todas as classificações possíveis, tornando a avaliação mais objetiva sobre a qualidade dos modelos (FRATTINI; CROSTA; CARRARA, 2010). Como técnicas mais utilizadas, destacam-se as curvas *Receiver Operating Characteristics* (ROC) (BRADLEY, 1997; FAWCETT, 2006) e as Taxas de Sucesso e Predição (CHUNG; FABBRI, 1999, 2003).

As curvas ROC (**Figura 4**) são obtidas a partir de matrizes de contingência, uma *técnica de validação dependente de classificação* que consiste em uma tabela para avaliar as predições de modelos de acordo com as instabilidades observadas (FRATTINI; CROSTA; CARRARA, 2010; COROMINAS et al., 2014). As matrizes de contingência (**Tabela 4**) classificam as predições de um modelo em classes instáveis e estáveis de acordo com um valor de corte que pode ou não ser arbitrário. Estes resultados são comparados com as instabilidades observadas no terreno, utilizando um inventário de cicatrizes, podendo ser classificados como (FAWCETT, 2006):

Verdadeiro Positivo (VP) quando a predição indica instabilidade na unidade de mapeamento e existem cicatrizes nesta unidade de mapeamento;

Falso Positivo (FP) quando a predição aponta instabilidade na unidade de mapeamento, mas o inventário não registra cicatrizes nesta área;

Falso Negativo (FN) quando a predição classifica uma unidade de mapeamento como estável, mas existem instabilidades observadas no terreno; e

Verdadeiro Negativo (VN) quando a predição classifica uma unidade de mapeamento como estável e não existem registros de cicatrizes nesta unidade de mapeamento

Tabela 4 – Exemplo esquemático de matriz de contingência

INVENTÁRIO			
MODELO	Instável		Estável
	Instável	Verdadeiro Positivo (VP)	Falso Positivo (FP) (<i>erro de comissão</i>)
	Estável	Falso Negativo (FN) (<i>erros de omissão</i>)	Verdadeiro Negativo (VN)

Fonte: Fawcett (2006).

As curvas ROC são obtidas pela produção de matrizes de contingência 2x2 para todas as classificações possíveis, relacionando a Taxa de Verdadeiros Positivos (proporção de áreas corretamente classificadas como instáveis em relação ao total de áreas instáveis) ($TVP = VP / (VP + FN)$) e a Taxa de Falsos Positivos (proporção de áreas incorretamente classificadas como instáveis em relação ao total de áreas estáveis) ($TFP = FP / (FP + VN)$) e permitindo avaliações de desempenho sem que classificações arbitrárias sejam necessárias em um primeiro momento (FAWCETT, 2006).

Figura 4: Exemplo de curva ROC produzido a partir de amostra de dados (ROCR.simple) do pacote ROCR do software estatístico R..

De maneira geral, quanto mais próxima do eixo-y do gráfico for a curva ROC maior a qualidade do cenário. Logo, quanto maior a *área abaixo da curva ROC* (AAC ROC) maior é a qualidade do cenário (BRADLEY, 1997; ZÊZERE et al., 2017). A AAC ROC varia entre zero e 1.0, com valor igual a 1.0 indicando uma predição perfeita (não existem falsos positivos), enquanto que valores iguais ou inferiores a 0.5 mostram que o modelo não é melhor que uma predição aleatória (FAWCETT, 2006). Os valores de AAC ROC podem ser interpretados de acordo com a proposta de Fressard, Thiery e Maquaire (2014) (**Tabela 5**), que estabelecem cinco níveis de qualidade possíveis para um cenário de um modelo.

Tabela 5 – Nível de qualidade de um cenário a partir de valores de área abaixo da curva ROC.

Nível de qualidade do modelo	Valor de AAC ROC
Excelente	$AAC\ ROC > 0.90$
Bom	$0.80 < AAC\ ROC < 0.90$
Razoável	$0.70 < AAC\ ROC < 0.80$
Ruim	$AAC\ ROC < 0.70$

Traduzido e adaptado de Fressard et al. (2014).

Já as Taxas de Sucesso e Predição consistem em gráficos que relacionam o percentual cumulativo de unidades de mapeamento afetadas por escorregamentos (eixo-y) e a porcentagem cumulativa da área de estudo, ordenada por ordem decrescente de suscetibilidade (eixo-x) (**Figura 5**). Esta técnica de validação permite avaliar o quanto as áreas classificadas como mais suscetíveis pelo modelo de suscetibilidade concentram cicatrizes de escorregamento (CHUNG; FABBRI, 1999, 2003).

No caso de modelos estatísticos, a Taxa de Sucesso permite avaliar o quanto as predições são capazes de identificar corretamente as cicatrizes utilizadas para construir os cenários, enquanto que a Taxa de Predição é obtida a partir de um conjunto de cicatrizes independente do processo de construção do cenário e permitindo que sua capacidade preditiva seja quantificada. As Taxas de Sucesso e Predição seguem as mesmas regras de interpretação que as curvas ROC (ZÊZERE et al., 2017).

Figura 5: Exemplo de aplicação das Taxas de Sucesso e Predição e valores de Área Abaixo da Curva (AAC). Fonte: BONINI et al. (2019).

Tanto a Curva ROC quanto as Taxas de Sucesso e Predição compartilham a limitação de não serem espacialmente explícitas quanto aos padrões de distribuição das áreas consideradas estáveis e instáveis pelo modelo (ZÊZERE et al., 2017; REICHENBACH et al., 2018; VAKHSHOORI; ZARE, 2018). Portanto, mapas de suscetibilidade diferentes podem possuir valores de área abaixo da curva ROC e Taxas de Sucesso e Predição muito próximos ou mesmo iguais (REICHENBACH et al., 2018).

Nestes casos em que mapas de suscetibilidade com padrões espaciais diferentes possuem valores iguais para as métricas de validação citadas, é recomendado quantificar a similaridade espacial entre os mapas e, caso seja possível, integrá-los para que o padrão espacial de suscetibilidade mais confiável seja obtido (VAKHSHOORI; ZARE, 2018).

Dentre as técnicas para realizar a quantificação da similaridade, trabalhos anteriores utilizaram o índice Kappa de Cohen (**Equação 4**) (COHEN, 1960). Este índice expressa a similaridade entre dois mapas considerando o acordo que pode existir entre eles aleatoriamente, variando de -1 (totalmente diferentes) a 1 (totalmente iguais) (COHEN, 1960; ZÊZERE et al., 2017; VAKHSHOORI; ZARE, 2018). O índice Kappa pode ser obtido a partir da Equação 3 e sua interpretação pode ser feita a partir da escala de acordo proposta por Landis e Koch (1977) (**Tabela 6**).

$$\kappa = \frac{p_o - p_e}{1 - p_e} = \frac{\left(\frac{VP+VN}{N}\right)}{\frac{(VP+FN)(VP+FP)+(FN+VN)}{N^2}} \quad (4)$$

Em que κ é o Índice Kappa; p_o é acordo observado entre as classificações dos modelos; p_e é a probabilidade hipotética de acordo aleatório entre as classificações; e N é número total de pixels ou a área total dos mapas

Tabela 6 -Escala de acordo a partir do índice Kappa proposta por Landis e Koch (1977).
Traduzido e adaptado de Landis e Koch (1977).

Grau de acordo	Valor assumido pelo índice Kappa (κ)
Quase perfeito	$\kappa > 0.80$
Substancial	$0.60 < \kappa < 0.80$
Moderado	$0.40 < \kappa < 0.60$
Razoável	$0.20 < \kappa < 0.40$
Fraco	$\kappa < 0.20$

3. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo possui 57 km² de área e se localiza no município de São Luiz do Paraitinga (**Figura 6**), constituída pelas bacias do córrego dos Pintos (15 km²), córrego da Fazendinha (13 km²) e do Alto rio Chapéu (29 km²).

Em contexto regional, a área se situa no segmento central do Rift Continental do Sudeste do Brasil, que se desenvolveu a partir do Jurássico Superior sobre rochas ígneas, migmatíticas e metamórficas neoproterozoicas, possuindo extensas zonas de cisalhamento com orientação NE a E-W (RICCOMINI, 1989; RICCOMINI; SANT'ANNA; FERRARI, 2004; ZALÁN; OLIVEIRA, 2005). As bacias selecionadas se localizam no Planalto de Paraitinga-Paraibuna, que tem relevo de morros altos e alongados com topos convexos ou aguçados e dissecação do relevo variando de média a alta (ROSS; MOROZ, 1996).

A geologia é composta, principalmente, por granitoides, migmatitos homogêneos e heterogêneos com estrutura estromatítica, nebulítica e anatexítica, micaxistos e quartzo-micaxistos e uma zona de transição composta por rochas brechóides (HASUI et al., 1978a). De forma geral, os solos desenvolvidos a partir dos migmatitos possuem textura

argilo-arenosa, espessura entre 2 a 3 metros e presença de matacões em áreas onde ocorrem intercalações graníticas. Já os solos originados a partir dos granitoides possuem textura areno-argilosa e são menos espessos (1m a 2m), com presença frequente de matacões especialmente em corpos rochosos cortados e muito fraturados (HASUI et al., 1978b, 1978a).

Trabalhos anteriores destacaram a influência da litoeestrutura sobre a ocorrência de escorregamentos no Planalto de Paraitinga-Paraibuna (OLIVEIRA; VIEIRA; ROSS, 2018; OLIVEIRA, 2019). As rochas metamórficas da área de estudo possuem orientação preferencial de seus planos de foliação de NW e N (**Figura 7**), mesma orientação preferencial das vertentes que possuem maior suscetibilidade a escorregamentos (OLIVEIRA, 2019).

Figura 6: Mapa de localização das bacias no contexto do município de São Luiz do Paraitinga e a litoestrutura predominante

Figura 7: Diagrama de roseta com o rumo do mergulho preferencial da foliação metamórfica no Planalto de Paraitinga-Paraibuna. Fonte: OLIVEIRA (2019).

Fundado em 1769, a consolidação da ocupação no município de São Luiz do Paraitinga esteve associada à sua utilização como rota de passagem para escoar parte da produção aurífera de Minas Gerais (PETRONE, 1959). As mudanças no uso da terra no município de São Luiz do Paraitinga se aceleraram no século XIX acompanhando o ciclo de expansão do café no vale do Paraíba do Sul, com aumento na velocidade da supressão da vegetação nativa (**Figura 8A**) para a expansão da monocultura cafeeira (PETRONE, 1959; BROLLO; CARLOS; GUEDES, 2010; PADILHA, 2019).

Figura 8: Fotografias de trabalho de campo na área de estudo. (A) Pastagem em primeiro plano e fragmento de mata nativa ao fundo; (B) Pasto em relevo plano e nas vertentes. **Fonte:** GPmorfo.

Com o declínio da monocultura cafeeira em fins do século XIX e início do século XX as áreas de cafeicultura foram gradativamente substituídas por pastos para criação de gado leiteiro (**Figura 8B**) e agricultura de forrageiras e de subsistência (**Figura 9A**), processo que expandiu o desmatamento das vertentes para a criação de pastos (PETRONE, 1959), o tipo de uso da terra predominante no município até a atualidade (BROLLO; CARLOS; GUEDES, 2010). Com o declínio da produção de gado leiteiro na região na década de 1980, parte dos pastos foi convertida em plantações de eucaliptos para produção de papel e celulose (**Figura 9B**) (BROLLO; CARLOS; GUEDES, 2010).

Figura 9: Fotografias de trabalho de campo em São Luiz do Paraitinga. (A) Pasto com campo agrícola; (B) Área com uso misto de silvicultura e pasto.

A precipitação anual média para o município de São Luiz do Paraitinga é de 1429mm, com chuvas concentradas entre os meses de novembro e março e menores índices de precipitação entre abril e setembro. O mês de dezembro de 2009 foi o mais chuvoso já registrado no município (625.5mm) (**Figura 10**). As chuvas se iniciaram em 03/12/2009 com um evento pluviométrico intenso (112mm/24h) que deflagrou diversos escorregamentos rasos (HORTA, 2017).

Figura 10: Precipitação entre os meses de novembro de 2008 e fevereiro de 2010. Fonte: Agência Nacional de Águas.

Além deste evento, ocorreram novamente precipitações prolongadas no final do mês de dezembro com acumulado de precipitação em 96h igual 109.2mm no dia 31/12/2009. As chuvas persistiram no dia 31/12/2009 e madrugada do dia 01/01/2010, totalizando mais 69mm (**Figura 11**). Há registros de precipitação instantânea por radar indicando a ocorrência de chuvas de até 50mm/h em determinadas áreas dos municípios de São Luiz do Paraitinga, Lagoinha e Cunha, com acumulados em 96h de até 325mm (STABILE; COLÂNGELO, 2017).

Figura 11: Precipitação horária entre os 28/12/2009 e 01/01/2010. Fonte: INMET.

Como resultado destas precipitações intensas, centenas de escorregamentos rasos foram deflagrados nas vertentes do município (**Figura 12** e **Figura 13**) e o rio Paraitinga atingiu os níveis mais elevados já registrados (11m acima do normal) causando a inundação do centro histórico do município, considerado patrimônio histórico nacional, e de áreas rurais. Os escorregamentos e a inundação causaram 1 morte e deixaram centenas de pessoas desabrigadas (**Figura 14**), além de danos graves ao patrimônio histórico e cultural (**Figura 15**), prejuízos econômicos e danos a infraestrutura de transportes e energia.

Figura 12: Escorregamentos em vertentes do município de São Luiz do Paraitinga deflagrados no verão de 2009-2010. Fonte: IPT-SP

Figura 13: Escorregamento em vertente próxima à estrada no município de São Luiz do Paraitinga. Fonte: IPT-SP.

Figura 14: Rompimentos de talude no núcleo urbano de São Luiz do Paraitinga devido ao evento do verão de 2009-2010. **Fonte:** IPT-SP.

Figura 15: Centro histórico de São do Paraitinga após o evento dos dias 31/12/2009 e 01/01/2010. Ao centro, os escombros da igreja matriz atingida pela inundação. **Fonte:** IPT-SP.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Dados de entrada para os modelos

4.1.1 Inventário de cicatrizes

Foi utilizado o inventário de Oliveira, Vieira e Ross (2018), produzido a partir do inventário oficial para a região (CPRM, IPT, 2014) complementado por meio de interpretação visual das ortofotos da Empresa Paulista de Planejamento Metropolitano (EMPLASA) dos anos de 2010-2011 (1m de resolução) e de imagens *Google Earth*, com posterior validação em campo. Os autores mapearam 567 cicatrizes nos municípios de São Luiz do Paraitinga e Lagoinha, a maioria de escorregamentos rasos, das quais 186 cicatrizes se localizam na área de estudo (32.8%) (**Figura 16**).

Figura 16: Recorte do inventário de Oliveira et al. (2018) para a área de estudo.

Foram realizados dois trabalhos de campo na região (Abril e Julho de 2019) para verificação de algumas cicatrizes de escorregamentos e reconhecimento da área de estudo. Posteriormente, o inventário foi reavaliado utilizando uma abordagem semiautomática (**Figura 17**). Esta consistiu na geração de polígonos por meio de segmentação orientada a objetos das ortofotos da EMPLASA de 2010-2011

(BLASCHKE, 2010). A segmentação foi realizada utilizando o algoritmo *Seeded Region Growing* (ADAMS; BISCHOF, 1994) em iterações, que analisa os pixels em pontos iniciais aleatórios (*seeds*) e define com base na vizinhança se esse pixel deve ser adicionado à região. Este algoritmo foi aplicado com a *tool chain Object Based Image Segmentation* do SAGA GIS.

Dentre os polígonos produzidos pela segmentação, foram selecionados aqueles localizados em um raio de 15m em relação aos pontos do primeiro inventário. Em seguida, foram mantidos aqueles que correspondiam ao terço superior das cicatrizes e calculados os centroides destes polígonos. Todos os procedimentos foram realizados no *software* livre SAGA 6.3.0- *System for Automated Geoscientific Analyses* (CONRAD et al., 2015).

ETAPA	EXEMPLO DE RESULTADO
Etapa I Segmentação orientada a objetos <i>(Tool chain: Object Based Image Segmentation; bandwidth= 2; Neumann neighbourhood)</i>
Etapa II <i>Spatial Join</i> com raio de 15m entre os segmentos e o inventário de Oliveira <i>et al.</i> (2018).
Etapa III Seleção dos segmentos correspondentes ao terço superior da cicatriz por interpretação visual União dos segmentos e suavização de arestas <i>(Polygon Smoothing; Gaussian filter; Sigma=2)</i>
Etapa IV Obtenção da área (m ²) de cada cicatriz; Cálculo das coordenadas do centroide da cicatriz.

Figura 17: Esquema da abordagem semiautomática para definição dos polígonos das cicatrizes de escorregamento.

Em seguida, foi feita uma análise exploratória dos dados por meio de *boxplots* relacionando a área das zonas de ruptura identificadas ao ângulo das vertentes onde se localizam. Também foram avaliadas por meio de *boxplots* as relações entre área das cicatrizes, ângulo da vertente e litotipo.

4.1.2 Fatores condicionantes

Foram elaborados seis mapas de fatores condicionantes dos escorregamentos: ângulo da vertente; orientação da vertente; Índice Topográfico de Umidade; curvatura

geral; litotipo; e uso da terra. Os quatro primeiros mapas de fatores condicionantes foram derivados a partir de um Modelo Digital de Elevação (MDE) *TanDEM-X*¹ (KRIEGER et al., 2013) (12m de resolução horizontal; < 10m de resolução vertical) utilizando o *software* SAGA. O MDE utilizado foi comparado com outros produtos de abrangência global (SRTM; ASTER GDEM; ALOS AW3D; e TanDEM-X 30m) por Grohmann (2018) em diferentes áreas do território brasileiro, sendo capaz de fornecer uma boa representação do terreno.

O mapa de ângulo das vertentes foi classificado em seis classes (< 10°; 10°-17°; 17°-23°; 23°-29°; 29°-37°; e > 37°), definidas considerando trabalhos anteriores que indicaram maior ocorrência de escorregamentos em vertentes com ângulo entre 18° e 40° (FERNANDES et al., 2004; DIAS; DIAS; VIEIRA, 2017; MARTINS et al., 2017). A área de contribuição necessária para o cálculo do TWI foi obtida utilizando o algoritmo *Multiple Flow Direction* (MFD) (QUINN et al., 1991). As classes do mapa de TWI foram definidas a partir do algoritmo de Quebras Naturais de Jenks (JENKS, 1977).

O mapa de curvatura foi classificado em três classes: côncava (< -0.04); retilínea (-0.04 a 0.04); e convexa (> 0.04). Os valores de corte para o mapa de curvatura foram definidos após uma sequência de testes e considerando valores adotados em outros trabalhos (VALERIANO; CARVALHO JÚNIOR, 2003).

O mapa de litotipos foi obtido a partir de um mapa geológico em escala 1:100.000 produzido pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT-SP) (HASUI et al., 1978a). Por fim, o mapa de uso da terra foi produzido por interpretação visual das ortofotos EMPLASA de 2010-2011, identificando as seguintes classes: agricultura; estradas; florestas secundárias; áreas ocupadas; pastos; reservatórios de água; e silvicultura.

Assim como no trabalho de Zêzere et al. (2017) que compara modelos de base estatística bivariados e multivariados, optou-se nesta pesquisa por utilizar os mesmos parâmetros no modelo de base estatística e no modelo de base heurística para reduzir incertezas não avaliadas neste trabalho e que são associadas a escala e qualidade dos dados disponíveis

¹ O MDE TanDEM-X foi disponibilizado pelo German Aerospace Centre (DLR) através de um Announcement of Opportunity & Proposal Call (proposal DEM_GEOL0538) concedido a C. H. Grohmann (IEE-USP).

4.2 Aplicação do Modelo do Valor Informativo

Para aplicação do modelo do Valor Informativo, o inventário de cicatrizes com cada feição representada pelo centroide da zona de ruptura foi dividido em dois grupos (**Figura 18**). Visando avaliar incertezas associadas à amostragem aleatória de cicatrizes, foram produzidas três partições aleatórias, resultando em três cenários de fragilidade ambiental de base estatística (**VI-P1**; **VI-P2**; **VI-P3**) (**Figura 18**). Cada partição consiste em dois grupos com a mesma quantidade de cicatrizes: o *grupo treino* (utilizado no cálculo do Valor Informativo) e o *grupo teste* (utilizado apenas na etapa de validação).

Figura 18: Fluxograma dos procedimentos para aplicação do modelo do Valor Informativo.

Os três cenários foram integrados utilizando funções de sobreposição por valor de célula *mediana*, *máximo* e *mínimo* entre as células de cada mapa (**Figura 19**). A

sobreposição por mediana é gerada pela determinação do valor mediano entre os valores assumidos por determinada célula nos três cenários, resultando em um cenário moderado da fragilidade ambiental. A sobreposição por valor máximo maximiza a área das classes de fragilidade ambiental alta e muito alta, atribuindo o valor mais alto de cada célula nos três cenários ao cenário integrado. Por fim, a função de sobreposição por valor *mínimo* resulta em um mapa que indica as áreas mais críticas de suscetibilidade, já que uma célula apenas será classificada como de fragilidade muito alta no cenário integrado se todos os cenários assim a classificarem.

Figura 19: Funções álgebra de mapas por sobreposição por valor de célula mediano, máximo e mínimo. Organizado pelo autor.

Este procedimento de integração foi adotado por Vakhshoori e Zare (2018) para obter mapas com padrões espaciais de suscetibilidade mais confiáveis a partir de um conjunto de cenários gerados. Entretanto, foi necessário alterar a proposta original de integração por maioria de valores, optando-se pela mediana. Isso se justifica pela quantidade menor de cenários produzidos neste trabalho (3) em comparação com o

número de cenários produzido pelos autores citados (18), resultando em pixels em que as classes de fragilidade ambiental não se repetiam nos cenários para haver uma maioria.

4.3 Aplicação do modelo heurístico de fragilidade ambiental

Para aplicação do modelo heurístico, foi utilizado o inventário completo com cada feição representada pelo centroide da zona de ruptura. Para embasar a atribuição de valores de ponderação a cada classe de cada um dos parâmetros foi calculado o Potencial de Escorregamento (*PE*) (GAO, 1993). O Potencial de Escorregamento (**Equação 5**) assume valores percentuais que mostram a propensão a escorregamentos de uma classe de determinado fator condicionante, mais elevada quanto maiores forem os valores de *PE*.

$$PE = \frac{NA_i}{N_i} \quad (5)$$

Em que N_i é o número de centroides de cicatriz em uma classe i de um fator condicionante e NA_i é o número de cicatrizes de escorregamentos em uma classe i de um fator condicionante.

Em seguida, os valores de *PE* de cada classe foram normalizados em uma escala de 0 a 1, com a classificação do grau de fragilidade ambiental realizada a partir de uma divisão em cinco classes (**Figura 20**). Classes com valor de *PE* normalizado igual zero não possuem cicatrizes de escorregamentos e foram consideradas como de *fragilidade ambiental muito baixa* (1); as classes com *PE* normalizado entre 0.01 e 0.25 foram consideradas como de *fragilidade ambiental baixa* (2); classes com valores de *PE* normalizados entre 0.26 e 0.50 foram classificadas como de *fragilidade ambiental moderada* (3); as classes com valores de *PE* normalizado entre 0.51 e 0.75 foram classificadas como de *fragilidade ambiental alta* (4); e classes com *PE* normalizado superior a 0.76 foram consideradas como de *fragilidade ambiental muito alta* (5).

Figura 20: Escala para classificação do grau de fragilidade ambiental com base no Potencial de Escorregamento (PE) normalizado.

Após a atribuição dos valores de ponderação à cada classe de cada parâmetro, os mapas reclassificados foram integrados por meio de uma soma simples para compor um índice de fragilidade ambiental. As áreas de menor fragilidade ambiental possuem os menores valores do índice de fragilidade, enquanto que as mais propensas a escorregamentos possuem os valores mais elevados.

4.4 Validação

A validação dos modelos foi realizada em dois passos: a) *Quantificação do desempenho e capacidade preditiva dos modelos heurístico e estatístico*; e b) *Avaliação da similaridade do padrão espacial de fragilidade ambiental dos modelos*. Os procedimentos foram realizados para o mapa de fragilidade ambiental de base heurística e para todos os três cenários do modelo do Valor Informativo.

4.4.1 Desempenho e capacidade preditiva

Foram construídas curvas de Características de Operação do Receptor (*Receiver Operating Characteristics*) (ROC) com o Grupo Treino e o Grupo Teste para avaliar, respectivamente, o desempenho e a capacidade preditiva do modelo estatístico. Para o modelo heurístico, a curva ROC foi construída utilizando o inventário completo. Como critério foi utilizada a Área Abaixo da Curva ROC (AACROC) (BRADLEY, 1997).

Para comparação com a AACROC, foram calculadas as Taxas de Sucesso e Predição (CHUNG; FABBRI, 1999, 2003). Assim como a curva ROC, as Taxas de Sucesso as Áreas Abaixo das Curvas de Sucesso e Predição (AACTS e AACTP, respectivamente) possuem as mesmas regras de interpretação que a AACROC, sendo

indicadores gerais da qualidade do modelo em termos de desempenho e capacidade preditiva, respectivamente (CHUNG; FABBRI, 1999, 2003; FRATTINI; CROSTA; CARRARA, 2010; REICHENBACH et al., 2018).

4.4.2 Similaridade espacial dos padrões de fragilidade ambiental

No *segundo passo* foi avaliada a similaridade pixel-a-pixel entre os mapas finais de fragilidade com o Kappa de Cohen (κ) (COHEN, 1960). Essa comparação permite avaliar o quanto os modelos convergem na definição das classes de fragilidade ambiental, tornando possível avaliar o acordo entre as predições.

Para obtenção deste índice os cenários de base heurística e estatística foram classificados em classes com áreas iguais, de modo que o valor de κ mostre apenas diferenças no padrão espacial de cada mapa (VAKHSOORI; ZARE, 2016). As classes de fragilidade ambiental dos mapas foram definidas da seguinte forma: Muito Alta (10% da área); Alta (10% da área); Moderada (20% da área); Baixa (20% da área); e Muito Baixa (40% da área). O Índice κ foi computado com *software Map Comparison Kit 3* (VISSER; DE NIJS, 2006).

O índice κ não foi calculado para comparar o modelo heurístico com os cenários integrados do Valor Informativo, em função da área muito distinta das classes de fragilidade ambiental entre os mapas. Para esta comparação, foram calculadas a área de cada classe e a área afetada por cicatrizes, objetivando identificar qual dos cenários finais de Valor Informativo mais se assemelham ao modelo heurístico em termos de área considerada como instável (classes de fragilidade ambiental Alta e Muito Alta).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Condicionantes e Características das cicatrizes

As cicatrizes possuem área média de 117.7m² e mediana de 100.5m². Cinco cicatrizes foram consideradas *outliers*, com valores de área entre 321.8m² e 468.6m² (**Figura 21**). Há predominância de cicatrizes com área entre 63.92m² (1º quartil). e 157.05m² (3º quartil) e ampla variação no ângulo das vertentes em que se localizam as cicatrizes, que possuem ângulos entre 10º até acima de 40º.

Figura 21: Boxplot da distribuição das cicatrizes em função da área (m²) e do ângulo da vertente (graus).

As maiores cicatrizes (> 300 m²) se concentram nas vertentes com ângulo entre 20° e 30° e embasadas por rochas granitoides, que ocupam a maior área, e por metatexitos nebulítico (**Figura 23**). A menor ocorrência de cicatrizes em ângulos superiores a 30°, principalmente nos granitoides, pode estar associada a presença de afloramentos rochosos (**Figura 22**) e a ausência de material para deflagração de um escorregamento (FERNANDES et al., 2001, 2004; VIEIRA, 2007; MICHEL; KOBAYAMA; GOERL, 2014; NERY; VIEIRA, 2015; BONINI, 2017; BONINI et al., 2017), também podendo se relacionar com a distribuição espacial da precipitação

Figura 22: Afloramento rochoso em área classificada como granitoide na estrada do ribeirão do Pinga, próximo a Catuçaba (São Luiz do Paraitinga). Fonte: GPmorfo.

Desconsiderando os *outliers*, as cicatrizes em vertentes de migmatitos homogêneos estromatíticos possuem áreas similares daquelas em granitoides e metatexitos nebulíticos, com ângulos entre 20° e 40°. A mesma tendência foi verificada para a faixa de transição e micaxistos, porém com presença de cicatrizes em vertentes com ângulos entre 30° e 40°, o que pode ser explicado pela abrangência restrita dessas litologias.

A ocorrência de cicatrizes em vertentes com ângulos menores nas áreas de granitoides e metatexitos pode inferir um maior controle destes litotipos sobre as propriedades geotécnicas (coesão; ângulo de atrito interno, etc) dos solos residuais (WOLLE et al., 1985). A concentração da maioria das cicatrizes consideradas *outliers* nos metatexitos nebulíticos indica a maior fragilidade ambiental dos solos residuais derivados deste litotipo, o que pode estar associado, entre outros fatores, ao rumo do mergulho dos planos de foliação metamórfica sub-verticais, com orientação predominante para NW e N (OLIVEIRA, 2019), que podem favorecer o desenvolvimento de zonas de alteração preferencial (SELBY, 1993; FERNANDES; AMARAL, 1996)

Figura 23: Boxplots da distribuição de cicatrizes em função da área (m²) e ângulo da vertente (graus) por litotipo e mapa geológico

5.2 Cenários do modelo do Valor Informativo

A concentração dos Valores Informativos mínimos (-2.97 em VI-P1; -2.97 em VI-P2; e -2.31 em VI-P3) e máximos (1.45 em VI-P1; 1.22 em VI-P2; e 1.48 em VI-P3) (**Tabela 7**) nas classes de ângulo das vertentes (**Figura 24**) mostrou o controle exercido por este parâmetro sobre a ocorrência de escorregamentos na área de estudo. Os três cenários apontam que as vertentes mais instáveis possuem ângulo superior a 24°, com o grau de fragilidade ambiental crescendo de forma diretamente proporcional ao ângulo da vertente até a classe entre 30° e 37°. Vertentes com ângulo superior a 37° registraram menor fragilidade ambiental na maioria dos cenários (VI-P1 e VI-P2).

As vertentes orientadas para Norte, Noroeste, Leste e Oeste possuem maior fragilidade ambiental (Valor Informativo positivo) que as demais orientações em todos os três cenários, exceto pela orientação Oeste (VI positivo apenas em VI-P2 e VI-P3) (**Tabela 7**) (**Figura 25**). Vertentes orientadas para Sul, Sudoeste e Leste possuem menor fragilidade ambiental, com Valores Informativos negativos em todos os três cenários.

Tabela 7 – Valor Informativo de cada classe de cada parâmetro

Parâmetro	Classe	Valor Informativo		
		P1	P2	P3
Ângulo das vertentes (graus)	< 10	-2.31	-2.31	-2.31
	11 – 17	-2.97	-2.97	-2.28
	18 – 23	-2.49	-1.24	-1.57
	24 – 29	-0.03	0.28	0.01
	30 – 37	1.45	1.22	1.28
	> 37	1.11	0.99	1.48
Orientação das vertentes	Norte	0.39	0.48	0.16
	Nordeste	-0.62	-1.13	-0.15
	Leste	0.55	0.24	0.67
	Sudeste	-0.55	-0.26	-0.40
	Sul	-0.74	-1.44	-0.74
	Sudoeste	-0.50	-0.66	-0.84
	Oeste	-0.22	0.12	0.19
	Noroeste	0.51	0.59	0.28
Índice Topográfico de Umidade	< 7.4	0.57	0.45	0.62
	7.5 - 8.6	-0.26	-0.19	-0.58
	8.7 - 10.2	-1.25	-0.69	-0.69
	10.3 - 12.5	-3.00	-0.63	-1.73
	12.6 - 15.4	-1.03	-3.00	-1.03
	> 15.5	-3.00	-3.00	-3.00
Curvatura geral	Côncavo	0.05	0.12	-0.02
	Retilíneo	0.16	0.03	0.27
	Convexo	-0.50	-0.61	-0.41
Litotipos	Granitoides	-0.14	-0.18	-0.08
	Migmatitos homogêneos estromatíticos	0.08	0.08	0.57
	Micaxistos	-0.98	-1.27	-1.67
	Faixa de transição	-0.51	-1.02	-0.51
	Metatexito nebulítico	0.98	1.15	0.73
Uso da terra	Agricultura	-3.00	-3.00	-3.00
	Estradas	-3.00	-3.00	-3.00
	Fragmentos de mata secundária	-1.56	-1.56	-1.38
	Áreas ocupadas	-3.00	-3.00	-3.00
	Pastagens	0.40	0.40	0.39
	Reservatório de água	-3.00	-3.00	-3.00
	Silvicultura	-3.00	-3.00	-3.00

Valores Informativos iguais a -3.00 correspondem às classes para as quais a equação do Valor Informativo não pode ser aplicada (ausência de cicatrizes)

Figura 24: Mapa de ângulo das vertentes

Figura 25: Mapa de orientação das vertentes

Apenas a classe de Índice Topográfico de Umidade (TWI) $< 7.4m^2$ possui maior fragilidade ambiental aos escorregamentos, com variação da fragilidade ambiental de forma inversamente proporcional aos aumentos de TWI (**Tabela 7**) (**Figura 26**). Não foram registradas cicatrizes na classe de TWI $> 15.5m^2$. Destaca-se a capacidade de discriminação entre classes instáveis e estáveis deste parâmetro, já que apenas uma classe está associada a maiores graus de fragilidade ambiental.

Em todos os três cenários, as vertentes com curvatura côncava e retilínea apresentaram maior fragilidade ambiental na maioria dos cenários, enquanto que as vertentes convexas possuem correlação com a ausência de cicatrizes em todos os cenários (**Tabela 7**) (**Figura 27**). No entanto, os Valores Informativos próximos de zero das classes côncava e retilínea indicam menor capacidade de discriminação entre classes estáveis e instáveis.

Figura 26: Mapa de Índice Topográfico de Umidade (TWI)

Figura 27: Mapa de curvatura geral (planta/perfil) das vertentes

O metatexito nebulítico e os migmatitos homogêneos estromatíticos apresentaram maior fragilidade ambiental (**Tabela 7**) (**Figura 28**). Já os granitoides, micaxistos e a Faixa de Transição apresentaram Valores Informativos negativos em todos os cenários, sendo, portanto, associados a uma menor fragilidade ambiental. Destaca-se que os granitoides embasam a maior parte da área.

Por fim, a pastagem foi a classe com maior grau de fragilidade ambiental (**Tabela 7**) (**Figura 29**). A classe correspondente aos fragmentos de mata secundária possui Valor Informativo negativo e inferior a -1.00 em todos os cenários, o que mostra uma associação negativa entre a ocorrência de escorregamentos e a presença de cobertura vegetal. Cinco das sete classes de uso da terra não possuem registros de cicatrizes (agricultura; estradas; áreas ocupadas; reservatório de água; e silvicultura).

Figura 28: Mapa de litotipos (1:100.000)

Figura 29: Mapa de uso da terra

As áreas abaixo da curva ROC para os três cenários possuem valores elevados, em torno de 90% (**Tabela 8**). A média de AACROC para o grupo treino entre os três cenários foi de 92% e para o grupo teste de 90%, valores considerados excelentes (FRESSARD; THIERY; MAQUAIRE, 2014). O mesmo é válido para as AAC da Taxa de Sucesso e de Predição, com valor médio de 90% e 89%, respectivamente.

Tabela 8 - Área abaixo da Curva ROC e Taxa de Sucesso e Predição para os cenários do modelo do Valor Informativo

	VI-P1	VI-P2	VI-P3	Média
AAC ROC (Treino)	0.92	0.92	0.90	0.92
AAC ROC (Teste)	0.89	0.91	0.91	0.90
AAC Taxa de Sucesso (Treino)	0.91	0.90	0.90	0.90
AAC Taxa de Predição (Teste)	0.87	0.89	0.90	0.89

5.3 Cenário do modelo heurístico

O Potencial de Escorregamento (PE) normalizado variou entre 0.00% e 12.29% (**Tabela 9**). Os valores mais altos de PE foram computados para as classes de ângulo entre 30° e 37° (12.29%), com valores iguais a zero para as seguintes classes: TWI: > 15.5m²; uso da terra: agricultura; estradas; áreas ocupadas; reservatório de água; e silvicultura.

Apenas as classes de ângulo das vertentes entre 30° e 37° e acima de 38° foram classificadas como de fragilidade ambiental muito alta (5) (**Tabela 9**). Há tendência de aumento da fragilidade ambiental de forma diretamente proporcional aos aumentos de ângulo da vertente, sem que ocorra uma diminuição do grau de fragilidade ambiental em vertentes muito íngremes (> 37°).

As vertentes orientadas para Norte, Noroeste, Leste e Oeste possuem fragilidade ambiental moderada (3) (**Tabela 9**). Todas as demais orientações de vertente possuem fragilidade ambiental baixa (2). Os valores próximos de fragilidade ambiental entre as classes de orientação indicam baixa capacidade de discriminação entre classes estáveis e instáveis para este parâmetro.

Somente a classe de TWI < 7.4 m² possui fragilidade ambiental moderada (3) (**Tabela 9**). Não foram registradas cicatrizes na classe de TWI > 15.5m² (Fragilidade Ambiental Muito Baixa – 1). Há tendência de diminuição da fragilidade ambiental com

aumentos do TWI, com fragilidade ambiental baixa (2) em todas as demais classes. Estes resultados indicam boa capacidade de discriminação entre classes estáveis e instáveis para este parâmetro.

As vertentes côncavas e retilíneas apresentaram fragilidade ambiental moderada (3) e as vertentes convexas fragilidade ambiental baixa (2) (**Tabela 9**). A partir do Potencial de Escorregamento nota-se que as vertentes com curvatura retilínea tendem a apresentar mais instabilidades que as vertentes côncavas, embora ambas as classes sejam agrupadas em um grau de fragilidade ambiental moderada.

O metatexito nebulítico apresentou fragilidade ambiental alta (4) e os migmatitos homogêneos estromatíticos fragilidade ambiental moderada (3) (**Tabela 9**), indicando que os metatexitos são mais propensos à ocorrência de escorregamentos na área. Os granitoides, micaxistos e a faixa de transição possuem fragilidade ambiental baixa (2).

As pastagens possuem fragilidade ambiental moderada (3) e os fragmentos de mata secundária possuem fragilidade ambiental baixa (2) (**Tabela 9**). Todas as demais classes deste parâmetro não possuem registros de cicatrizes e têm fragilidade ambiental muito baixa (1). Essas características indicam uma boa capacidade de discriminação entre classes instáveis e estáveis.

Tabela 9 - Potencial de Escorregamento e valores de fragilidade ambiental do modelo heurístico.

Parâmetro	Classe	PE	PE Normalizado	Grau de fragilidade
Ângulo das vertentes (graus)	< 10	0.16	0.01	2
	11 – 17	0.25	0.02	2
	18 – 23	0.61	0.05	2
	24 – 29	3.74	0.30	3
	30 – 37	12.29	1.00	5
	> 37	9.91	0.81	5
Orientação das vertentes	Norte	4.21	0.34	3
	Nordeste	1.93	0.16	2
	Leste	4.52	0.37	3
	Sudeste	2.67	0.22	2
	Sul	1.04	0.08	2
	Sudoeste	1.70	0.14	2
	Oeste	3.82	0.31	3
	Noroeste	5.57	0.45	3
Índice Topográfico de Umidade	< 7.4	5.68	0.46	3
	7.5 - 8.6	2.22	0.18	2
	8.7 - 10.2	1.53	0.12	2
	10.3 - 12.5	0.87	0.07	2
	12.6 - 15.4	0.58	0.05	2
	> 15.5	0.00	0.00	1
Curvatura geral	Côncavo	3.29	0.27	3
	Retilíneo	4.07	0.33	3
	Convexo	2.08	0.17	2
Litotipos	Granitoides	2.78	0.23	2
	Migmatitos homogêneos estromatíticos	4.45	0.36	3
	Micaxistos	0.92	0.08	2
	Faixa de transição	2.16	0.18	2
	Metatexito nebulítico	8.38	0.68	4
Uso da terra	Agricultura	0.00	0.00	1
	Estradas	0.00	0.00	1
	Fragmentos de mata secundária	0.62	0.05	2
	Áreas ocupadas	0.00	0.00	1
	Pastagens	4.90	0.40	3
	Reservatório de água	0.00	0.00	1
	Silvicultura	0.00	0.00	1
Fragilidade muito baixa (1) (PE = 0.00); Fragilidade baixa (2) (0.01 < PE > 0.25); Fragilidade moderada (3) (0.26 < PE > 0.50); Fragilidade alta (0.51 < PE > 0.75); Fragilidade muito alta (PE > 0.76)				

O valor de AACROC para o modelo heurístico foi igual a 94% (**Figura 30**). A Taxa de Sucesso (**Figura 31**) também apresentou valor de área abaixo da curva considerado bom (89%). Ambos os valores são considerados altos, com desempenho considerado excelente ($> 90\%$) medido pela curva ROC e considerado bom (entre 80% e 90%) quantificado com a Taxa de Sucesso (FRESSARD; THIERY; MAQUAIRE, 2014).

Figura 30: Curva ROC computada para o modelo heurístico

Figura 31: Taxa de sucesso computada para o modelo heurístico.

5.4 Comparação entre os modelos

Os resultados de ambos os modelos mostraram uma forte associação entre os escorregamentos rasos e o ângulo da vertente, com tendência de aumento da fragilidade ambiental com aumento do ângulo. Há consistência entre os modelos na classificação das vertentes com ângulos superiores a 24° como as de maior fragilidade ambiental. No entanto, o modelo heurístico não identificou a tendência de queda na fragilidade ambiental em vertentes muito íngremes (> 37°) conforme observado nos cenários do modelo do Valor Informativo.

Valores similares foram encontrados também em diferentes setores da Serra do Mar, onde vertentes com ângulos entre 20° e 40° são mais suscetíveis a escorregamentos rasos (FERNANDES et al., 2001, 2004; MICHEL; KOBAYAMA; GOERL, 2014; NERY; VIEIRA, 2015; LIN; GRAMANI; CAMPOS, 2016; BONINI, 2017; BONINI et al., 2017; DIAS; DIAS; VIEIRA, 2017; MARTINS et al., 2017; DIAS et al., 2018). Em grande parte destas pesquisas, há uma tendência de queda no número de cicatrizes em vertentes

> 40°, que pode estar associada a outros fatores condicionantes (por ex. a distribuição espacial das chuvas) ou a própria ausência de material superficial para sofrer rupturas.

Ambos os modelos identificaram as maiores fragilidades nas as vertentes orientadas para Norte, Noroeste, Leste e Oeste. Nas vertentes embasadas por rochas metamórficas, a maior fragilidade ambiental pode ser associada à atitude da foliação metamórfica, predominantemente sub-vertical e orientada para N, NW e SE (OLIVEIRA, 2019) e, portanto, coincidente com a direção de mergulho das vertentes de maior fragilidade ambiental. A presença destas estruturas conservadas no manto de alteração pode facilitar a infiltração de água na vertente gerando zonas de alteração preferenciais, aumentando a intensidade do intemperismo ao longo das discontinuidades e podendo aumentar a fragilidade ambiental dos solos (SELBY, 1993; OLIVEIRA, 2019).

Nas áreas embasadas por granitoides, a maior fragilidade ambiental das vertentes com orientação para Norte, Noroeste, Leste e Oeste pode estar associada à sua maior exposição aos eventos pluviométricos que deflagraram os escorregamentos, variável não analisada nesta pesquisa, e também a outros fatores condicionantes tais como a espessura dos solos residuais.

As áreas com Índice Topográfico de Umidade (TWI) < 7.4m² possuem fragilidade ambiental muito alta em ambos os modelos. Valores baixos de TWI correspondem a setores da vertente com baixa área de contribuição específica e menor tendência de acúmulo de umidade (BEVEN; KIRKBY, 1979; SEIBERT; STENDAHL; SØRENSEN, 2007), que podem estar sujeitos ao desenvolvimento zonas de saturação durante eventos pluviométricos intensos (BRAGAGNOLO; SILVA; GRZYBOWSKI, 2020). Outros trabalhos em diferentes contextos geomorfológicos também identificaram maior tendência de ocorrência de escorregamentos em áreas com valores baixos de TWI (PEREIRA; ZÊZERE; BATEIRA, 2012; HONG et al., 2015; BRAGAGNOLO; SILVA; GRZYBOWSKI, 2020).

Os modelos convergiram na identificação das curvaturas côncava e retilínea como as classes de maior fragilidade ambiental, enquanto que as curvaturas convexas foram associadas a um menor grau de fragilidade. Isso pode ser explicado pelo controle exercido pela curvatura sobre os fluxos subsuperficiais de água na vertente, com maior concentração em curvatura côncavas e dispersão em curvaturas convexas (SELBY, 1993; MONTGOMERY; DIETRICH, 1994).

Outros trabalhos identificaram maior quantidade de cicatrizes em curvaturas côncavas e retilíneas (FERNANDES et al., 2001; LISTO; VIEIRA, 2012; SALGADO, 2013; CIURLEO; CALVELLO; CASCINI, 2016; AFUNGANG; BATEIRA; NKWEMOH, 2017; CIURLEO; CASCINI; CALVELLO, 2017), mais propensas a rupturas porque requerem menores volumes de precipitação para o desenvolvimento de zonas de saturação (DIETRICH; MONTGOMERY, 1998).

Os metatexitos nebulíticos e os migmatitos homogêneos estromatíticos apresentaram maior fragilidade ambiental em ambos os modelos. Já os granitoides, micaxistos e a faixa de transição apresentaram menor fragilidade ambiental tanto no cenário do modelo heurístico quanto nos cenários do modelo estatístico. Isso pode ser associado ao controle exercido pelos litotipos sobre as propriedades geotécnicas dos solos residuais derivados de sua alteração (WOLLE et al., 1985; FERNANDES; AMARAL, 1996; GUERRA; BOTELHO, 1996).

Trabalhos anteriores identificaram as áreas embasadas por litologias metamórficas como as mais propensas a rupturas em diferentes setores da Serra do Mar e no Planalto de Paraitinga-Paraibuna (TATIZANA et al., 1987; ROSS; JUNQUEIRA; SANTOS, 2014; DIAS; DIAS; VIEIRA, 2017; OLIVEIRA; VIEIRA; ROSS, 2018; DIAS, 2019). A presença de zonas de transcorrência e a alta densidade de fraturas foi apontada nestes trabalhos como uma possível explicação da maior quantidade de cicatrizes de escorregamentos em áreas de litologias metamórficas.

Estas características estruturais podem ter influência sobre os fluxos de água e criar zonas de alteração preferencial (WOLLE; CARVALHO, 1994; BIERMAN; MONTGOMERY, 2014), potencialmente aumentando a fragilidade ambiental dos solos residuais. No entanto, faltam informações detalhadas sobre os solos residuais (tais como espessura, coesão e etc.), para que seja possível apontar a causa da maior fragilidade ambiental das litologias metamórficas no Planalto de Paraitinga-Paraibuna.

Por fim, a pastagem foi a classe com maior grau de fragilidade ambiental em ambos os modelos. A ausência de cicatrizes em determinadas classes de uso da terra mostra a associação entre estes tipos de uso e a estabilidade das vertentes. Destaca-se a baixa fragilidade ambiental das vertentes recobertas por fragmentos de mata secundária, tendência também identificada por outros trabalhos em diferentes áreas (GUTHRIE, 2002; BATHURST; BOVOLO; CISNEROS, 2010; GUNS; VANACKER, 2014; ROSS;

JUNQUEIRA; SANTOS, 2014; GOETZ; GUTHRIE; BRENNING, 2015; SCHMALTZ; STEGER; GLADE, 2017; PADILHA, 2019) e que poderia ser explicada pela maior coesão aparente dos solos em áreas com cobertura vegetal (GREENWAY, 1987; SCHMIDT et al., 2001).

A validação mostrou que os cenários do modelo do Valor Informativo e o cenário do modelo heurístico possuem qualidade similar, com valores de área abaixo da curva ROC e de Taxa de Sucesso considerados bons (entre 0.80 e 0.90) ou mesmo excelentes (> 0.90) (FRESSARD; THIERY; MAQUAIRE, 2014). No entanto, os cenários possuem diferenças quanto aos padrões espaciais de fragilidade ambiental (**Figura 32**), diferenças estas que as técnicas de validação independentes de classificação aplicadas (ROC e Taxa de Sucesso) são incapazes de identificar (ZÊZERE et al., 2017; REICHENBACH et al., 2018; VAKHSHOORI; ZARE, 2018).

Figura 32: Detalhe dos cenários de fragilidade ambiental produzidos. (A) Cenário obtido a partir do modelo heurístico; (B) Cenário VI-P1 do modelo do Valor Informativo; (C) Cenário VI-P2; (D) Cenário VI-P3

5.4.1 Similaridade espacial

Considerando todas as classes de fragilidade ambiental conjuntamente (κ geral) (**Tabela 10**), os cenários do modelo do Valor Informativo possuem acordo médio substancial ($0.60 < \kappa < 0.80$) (LANDIS; KOCH, 1977), com acordo máximo na classificação igual a 66% dos pixels (VI-P1 vs. VI-P3) e igual a 58% dos pixels nos demais pares de cenários. Na comparação dos cenários do modelo do Valor Informativo com o cenário do modelo heurístico, o acordo médio foi razoável ($0.20 < \kappa < 0.40$) (LANDIS; KOCH, 1977) (**Tabela 10**), com acordo na classificação inferior a 50% dos pixels em todos os pares de cenários (máximo de 46% de acordo para VI-P1 vs. Heurístico e mínimo de 36% com VI-P2 vs. Heurístico).

Tabela 10: Índice Kappa calculado individualmente para cada classe de fragilidade e para cada combinação de cenários

Modelos	κ calculado para cada classe de fragilidade					κ geral	κ geral médio
	Muito Alta	Alta	Moderada	Baixa	Muito Baixa		
VI-P1 vs. VI-P2	0.84	0.54	0.43	0.33	0.76	0.58	0.61
VI-P1 vs. VI-P3	0.89	0.65	0.59	0.42	0.77	0.66	
VI-P2 vs. VI-P3	0.84	0.48	0.45	0.36	0.76	0.58	
VI-P1 vs. Heurístico	0.76	0.21	0.28	0.33	0.66	0.46	0.42
VI-P2 vs. Heurístico	0.69	0.12	0.13	0.16	0.64	0.36	
VI-P3 vs. Heurístico	0.72	0.22	0.27	0.32	0.66	0.45	

Há uma tendência de maior acordo entre os cenários na classe de fragilidade ambiental *Muito Alta*, com acordo quase perfeito ($\kappa > 0.80$) (LANDIS; KOCH, 1977) entre os cenários do modelo do Valor Informativo e substancial ($0.60 < \kappa < 0.80$) entre estes cenários e o cenário do modelo heurístico (**Tabela 10**). Também foi identificada uma tendência de maior acordo na classe de fragilidade ambiental *Muito Baixa*, com acordo substancial para todos os pares de cenários (**Tabela 10**).

Nas classes de fragilidade ambiental intermediárias (*Alta*, *Moderada* e *Baixa*) houve menor acordo, com os cenários do modelo do Valor Informativo possuindo acordo moderado ($0.40 < \kappa < 0.60$) entre si nestas classes (**Tabela 10**). A discrepância aumenta nas classes intermediárias quando são comparados os cenários do modelo do Valor Informativo com o cenário do modelo heurístico, com acordo variando entre 12% e 22%

para a classe de fragilidade *Alta*; 13% e 28% para a classe de fragilidade *Moderada*; e 16% e 33% para a classe de fragilidade *Baixa*. Assim como Vakhshoori e Zare (2018), estes resultados demonstram que cenários com valores de área abaixo da curva ROC e taxas de sucesso e predição similares ou mesmo iguais podem possuir padrões espaciais muito distintos.

Estes resultados foram similares aos encontrados por Vakhshoori e Zare (2018), que justificam o maior acordo entre as classes extremas (*Muito Alta* e *Muito Baixa*) em função de haver apenas uma outra possibilidade de classificação nestes casos (as classes de fragilidade *Alta* ou *Baixa*), o que não ocorre nas classes intermediárias. Comportamento similar também foi observado por Zêzere et al. (2017), que obtiveram valores de Kappa mais elevados para as classes *Muito Alta* e *Muito Baixa* para a maioria dos pares de cenários de base estatística comparados.

Além disso, o menor acordo entre os cenários do modelo do Valor Informativo e o cenário do modelo heurístico pode ser explicado por diferenças no processo de aplicação dos modelos, principalmente incertezas associadas à partição do inventário de cicatrizes para construção dos cenários do modelo do Valor Informativo (REICHENBACH et al., 2018), procedimento não executado para aplicação do modelo heurístico. A influência da partição aleatória do inventário é evidente na variação de acordo entre os cenários do modelo do Valor Informativo, que possuem diferenças de até 8% no κ geral computado (**Tabela 10**).

5.4.2 Mapas de fragilidade heurísticos e cenários estatísticos integrados

5.4.2.1 Mapa final: Modelo heurístico

No mapa final gerado com o modelo heurístico (**Figura 33**), a quantidade de cicatrizes tende a aumentar de forma diretamente proporcional ao grau de fragilidade ambiental (**Tabela 11**). Já a área ocupada pelas classes diminui com aumentos do grau de fragilidade. Mais de 80.0% das cicatrizes de escorregamento se concentram nas classes de fragilidade ambiental Alta (10.8%) e Muito Alta (71.9%) que, juntas, perfazem 21.2% da área de estudo (aproximadamente 12 km²).

Tabela 11: Área afetada por cicatrizes e área total das classes de fragilidade do cenário heurístico e dos cenários estatísticos integrados

Fragilidade	Heurístico		VI – Mediana		VI - Máximo		VI - Mínimo	
	Área (%)	Cicatriz (%)	Área (%)	Cicatrizes (%)	Área (%)	Cicatrizes (%)	Área (%)	Cicatrizes (%)
Muito baixa	32.5	1.1	40.3	2.7	31.4	1.6	48.4	3.8
Baixa	27.8	4.9	20.9	2.7	20.0	1.6	19.2	3.2
Moderada	18.4	11.4	19.3	9.7	24.2	5.9	16.6	13.5
Alta	10.9	10.8	9.5	16.2	12.7	16.8	8.0	19.5
Muito alta	10.3	71.9	10.1	68.6	11.7	74.1	7.8	60.0

As classes de fragilidade ambiental Baixa e Moderada concentram 16.3% das cicatrizes de escorregamento e correspondem a aproximadamente metade da área de estudo (46.2%) (26.4 km²). Essa tendência de concentração da classificação da fragilidade ambiental em classes intermediárias de fragilidade foi observada em outros trabalhos que aplicaram o modelo proposto por Ross (1994) (DONHA et al., 2006; GAYOSO, 2014; PINESE JÚNIOR e RODRIGUES, 2012; TROMBETA et al., 2014).

Por exemplo, Trombete *et al.* (2014), em estudo realizado na UGRHI-22, identificaram que 47.58% da área (5.648 km²) possui fragilidade ambiental média. Comportamento semelhante foi observado no trabalho de Pinese Jr. e Rodrigues (2012) na bacia hidrográfica do rio Piedade (Triângulo Mineiro, Minas Gerais), onde a classe de fragilidade ambiental moderada perfaz 62.25% da bacia hidrográfica (1083.15 km²).

Figura 33: Mapa de fragilidade ambiental de base heurística

5.4.2.2 Mapa final: função de integração por mediana

No mapa obtido a partir da integração dos cenários do Valor Informativo pela **mediana** dos valores (**Figura 34**) (**Tabela 11**) há a mesma tendência de queda na área das classes com aumento do grau de fragilidade ambiental, com mais áreas classificadas como de fragilidade Muito Baixa que no modelo heurístico (48.8% em VI - Mediana e 32.5% no mapa de base heurística). Não há grande diferença na concentração de cicatrizes entre o mapa final obtido com o modelo heurístico e VI-Mediana, cujas classes de fragilidade ambiental Alta e Muito Alta possuem 2.1% mais cicatrizes que no mapa de base heurística (84.8% das cicatrizes em uma área equivalente a 19.6% do total ou 11.1 km²).

As mudanças no percentual de área ocupada pelas classes de fragilidade ambiental neste mapa foram pequenas em comparação com a distribuição de área das classes fixada para os cenários estatísticos individuais (VI-P1; VI-P2; e VI-P3) (40% na classe de fragilidade ambiental muito baixa; 20% na classe de baixa; 20% na classe moderada; 10% na classe alta; e 10% na classe muito alta).

Essa menor variação na área ocupada por cada classe em comparação com os cenários individuais do modelo de base estatística também foi observada por Vakhshoori e Zare (2018) no cenário integrado com função de sobreposição por maioria dos valores. Devido a essa menor variação, estes autores consideraram este cenário como o mais moderado de seu trabalho por concentrar um percentual elevado de cicatrizes nas classes de suscetibilidade alta e muito alta (69%) ao mesmo tempo em que classifica mais de 60% da área de estudo nas classes de menor suscetibilidade (baixa e muito baixa).

Figura 34: Mapa de fragilidade ambiental de base estatística (função de sobreposição por mediana)

5.4.2.3 Mapa final: função de integração por máximo

O mapa gerado pela sobreposição dos cenários de base estatística por **valor máximo (Figura 35)** apresentou a mesma tendência observada nos demais cenários, com o aumento da concentração de cicatrizes com o grau de fragilidade ambiental. Este é o cenário integrado com maior área nas classes de fragilidade ambiental alta (12.7% ou 7.2 km²) e muito alta (11.7% ou 6.7 km²) (**Tabela 11**).

O mapa obtido pela função de sobreposição por valor máximo também possui a maior concentração de cicatrizes nas classes de maior fragilidade ambiental, com 91% das cicatrizes nas classes de fragilidade ambiental alta (16.8%) e muito alta (74.1%). A classe de fragilidade ambiental muito baixa possui a menor área (31.4% ou 17.9 km²), com concentração de cicatrizes nesta classe similar à obtida no cenário de base heurística (1.6% em VI – Máximo e 1.1% no cenário heurístico) (**Tabela 11**).

A maior área e concentração de cicatrizes nas classes de fragilidade ambiental alta e muito alta de VI – Máximo ocorreu porque esta função de sobreposição atribui o valor máximo entre os três cenários às unidades de mapeamento. Portanto, basta que apenas um dos cenários classifique uma unidade de mapeamento como de fragilidade ambiental alta ou muito alta para que ela seja assim representada no mapa integrado. Trata-se de um cenário que maximiza a área com restrições de uso da terra (fragilidade alta e muito alta) que pode ser utilizado para elaboração de um planejamento territorial cujo objetivo seja evitar ao máximo áreas que podem ser propensas a ocorrência de movimentos de massa.

Figura 35: Mapa de fragilidade ambiental de base estatística (função de sobreposição por valor máximo)

5.4.2.4 Mapa final: função de integração por mínimo

O mapa obtido pela integração dos cenários do Valor Informativo com a função de sobreposição por **valor mínimo** mostra as zonas mais críticas de fragilidade ambiental (**Figura 36**), pois para que um pixel seja classificado como de fragilidade ambiental muito alta é necessário que todos os cenários do modelo do Valor Informativo tenham classificado este pixel desta forma. Neste mapa, 7.8% da área (4.45 km²) foi classificada como de fragilidade muito alta (**Tabela 11**), com 60.0% do total de cicatrizes nesta classe. Já as classes de fragilidade ambiental muito baixa e baixa ocupam 48.4% e 19.2% da área, respectivamente, juntas concentrando 7% do total de cicatrizes.

Ao indicar as zonas mais críticas de fragilidade ambiental este mapa é útil para identificar as áreas prioritárias para estudos detalhados sobre o perigo e os elementos expostos aos escorregamentos. Já as áreas classificadas como de fragilidade ambiental muito baixa e baixa devem ser analisadas com ressalvas, pois basta que apenas um dos cenários classifique uma unidade de mapeamento nestas classes de menor fragilidade ambiental para que ela seja assim representada no mapa integrado, o que pode implicar em falsos negativos e uma possível subestimação da fragilidade ambiental.

Figura 36: Mapa de fragilidade ambiental de base estatística (função de sobreposição por valor mínimo)

CONCLUSÕES

A aplicação dos modelos heurístico e do Valor Informativo para avaliação da fragilidade ambiental a escorregamentos rasos mostrou que a ocorrência de escorregamentos em São Luiz do Paraitinga (SP) está associada principalmente às vertentes com ângulo superior a 24° , com baixo Índice Topográfico de Umidade ($< 7.4m^2$) e embasadas por metatexitos nebulíticos e granitoides. No entanto, os resultados dessa pesquisa necessitam de uma avaliação mais detalhada sobre os fatores deflagradores (em especial a direção de deslocamento das massas de ar e intensidade da chuva) e também de levantamentos de campo ou aplicação de modelos matemáticos para estimação de espessura do solo para melhor explicar e caracterizar os diferentes graus de fragilidade ambiental de cada classe litológica.

A comparação entre os mapas de fragilidade ambiental de base heurística e de base estatística revelou que há acordo substancial entre os modelos, com maior acordo na classificação de áreas com fragilidade ambiental muito alta e muito baixa. O mapa final do Valor Informativo obtido pela sobreposição por valor máximo foi o mais similar ao mapa obtido a partir do modelo de base heurística. O mapa final produzido pela sobreposição dos cenários pelo valor de mediana foi considerado como a representação mais ponderada da fragilidade ambiental, podendo servir de base para outros estudos mais detalhados e para indicar as áreas com restrições ao uso da terra.

O desempenho e a capacidade preditiva quantificados utilizando técnicas estatísticas de validação (curva ROC e taxas de sucesso e predição) mostrou que tanto o cenário de base heurística quanto os cenários de base estatística possuem desempenho considerado excelente. Esse resultado indica a adequação da atribuição de pesos às variáveis do modelo da fragilidade ambiental, realizada a partir do inventário de cicatrizes e do Potencial de Escorregamento, contribuindo para reduzir a subjetividade da ponderação. A aplicação das técnicas de validação independentes de classificação e do índice Kappa foi fundamental para a realização desta pesquisa, possibilitando comparar o padrão espacial dos mapeamentos de fragilidade ambiental.

REFERÊNCIAS

- ADAMS, R.; BISCHOF, L. Seeded Region Growing. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, v. 16, n. 6, p. 641–647, 1994.
- AFUNGANG, R. N.; BATEIRA, C. V. D. M.; NKWEMOH, C. A. Assessing the spatial probability of landslides using GIS and informative value model in the Bamenda highlands. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 10, n. 17, p. 1–15, 2017.
- ALCÁNTARA-AYALA, I. Geomorphology, natural hazards, vulnerability and prevention of natural disasters in developing countries. **Geomorphology**, v. 47, n. 2–4, p. 107–124, 2002.
- ALEOTTI, P.; CHOWDHURY, R. Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v. 58, n. 1, p. 21–44, 1 ago. 1999. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s100640050066>>.
- ALHEIROS, M. M.; AUGUSTO FILHO, O. Landslides and Coastal Erosion Hazards In Brazil. **International Geology Review**, v. 39, n. 8, p. 756–763, 2010.
- AUGUSTO FILHO, O. Caracterização geológico-geotécnica voltada à estabilização de encostas: uma proposta metodológica. In: Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ABMS/ABGE/PUCRJ, 1992.
- AYALEW, L.; YAMAGISHI, H. The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan. **Geomorphology**, v. 65, n. 1–2, p. 15–31, 2005.
- BACANI, V. M. et al. Sensoriamento remoto e SIG aplicados à avaliação da fragilidade ambiental de bacia hidrográfica. **Mercator**, v. 14, n. 2, p. 119–135, 2015.
- BARATA, E. Landslides in the tropical region of Rio de Janeiro. In: Proceedings of the Seventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico. **Anais...** Mexico: 1969.
- BARBOSA, E. H.; SAKAMOTO, A. Y.; BACANI, V. M. Proposta de Zoneamento Ambiental para a bacia transfronteiriça do rio Apa. **Interações**, v. 17, n. 2, p. 210–222, 2016.

BARELLA, C. F.; SOBREIRA, F. G.; ZÊZERE, J. L. A comparative analysis of statistical landslide susceptibility mapping in the southeast region of Minas Gerais state, Brazil. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v. 78, n. 5, p. 3205–3221, 2019.

BARREDO, J. I. et al. Comparing heuristic landslide hazard assessment techniques using GIS in the Tirajana basin, Gran Canaria Island, Spain. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 2, n. 1, p. 9–23, 2000. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0303243400850229>>.

BATEIRA, C. V. D. M. Geometria dos terraços agrícolas e modelação da instabilidade de vertentes (Vale do Douro – Portugal). **Geosp – Espaço e Tempo**, v. 19, n. 2, p. 263–284, 2015.

BATHURST, J. C.; BOVOLO, C. I.; CISNEROS, F. Modelling the effect of forest cover on shallow landslides at the river basin scale. **Ecological Engineering**, v. 36, n. 3, p. 317–327, 2010.

BEGUERÍA, S. Validation and evaluation of predictive models in hazard assessment and risk management. **Natural Hazards**, v. 37, n. 3, p. 315–329, 2006.

BEVEN, K. J.; KIRKBY, M. J. A physically based , variable contributing area model of basin hydrology. **Hydrological Science Bulletin**, v. 24, n. 1, p. 43–69, 1979.

BIERMAN, P. R.; MONTGOMERY, D. R. **Key Concepts in Geomorphology**. New York: Freeman and Company Publishers, 2014.

BLASCHKE, T. Object based image analysis for remote sensing. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 65, n. 1, p. 2–16, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2009.06.004>>.

BONINI, J. E. et al. Parâmetros morfológicos e os escorregamentos na bacia do rio Gurutuba, Vale do Ribeira (SP). **Os Desafios da Geografia Física na Fronteira do Conhecimento**, n. October, p. 4011–4019, 2017. Disponível em: <<http://ocs.ige.unicamp.br/ojs/sbgfa/article/view/2553>>.

BONINI, J. E. **Análise comparativa da capacidade preditiva entre dois modelos matemáticos para avaliação de suscetibilidade à escorregamentos rasos: um estudo de caso em Itaóca (Vale do Ribeira, SP)**. 2017. Trabalho de Graduação Individual

(TGI). Departamento de Geografia, Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, 2017.

BONINI, J. E. et al. Influência dos dados de elevação no mapeamento de instabilidade de vertentes. In: PINHEIRO, L.S.; GORAYEB, A. (Ed.). **Geografia Física e as Mudanças Globais**. Fortaleza, Brasil: Editora UFC, 2019. p. 1–13.

BONINI, J. E. et al. Suscetibilidade a escorregamentos rasos a partir de parâmetros morfométricos e dos modelos SHALSTAB e do Valor Informativo. **Confins**, n. 46, 23 jun. 2020. Disponível em: <<http://journals.openedition.org/confins/30323>>.

BRABB, E. E. Innovative approaches to landslide hazard mapping. In: 4th International Symposium on Landslides, 16 a 21 de Setembro., Toronto, Canada. **Anais...** Toronto, Canada.: 1984.

BRADLEY, A. P. The use of the area under the ROC curve in the evaluation of machine learning algorithms. **Pattern recognition**, v. 30, n. 7, p. 1145–1159, 1997.

BRAGAGNOLO, L.; SILVA, R. V; GRZYBOWSKI, J. M. V. Artificial neural network ensembles applied to the mapping of landslide susceptibility. **Catena**, v. 184, n. January 2020, p. 104240, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104240>>.

BROLLO, M. J.; CARLOS, A.; GUEDES, M. Desastres Naturais E Riscos Em São Luiz Do Paraitinga (Sp). In: 7o Simpósio Brasileiro de Cartografia Geotécnica e Geoambiental, **Anais...**2010.

CAPITANI, M.; RIBOLINI, A.; BINI, M. The slope aspect : A predisposing factor for landsliding ? **Comptes rendus - Geoscience**, v. 345, n. 11–12, p. 427–438, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.crte.2013.11.002>>.

CAROU, C. B. et al. Fragilidade Potencial e Emergente em área de risco: Bairro Brigadeiro Tobias, Sorocaba - SP. **Revista Geonorte**, v. 10, n. Especial 4, p. 131–135, 2014.

CAROU, C. B. **Mineralogia do Granito Itaocá e sua relação com a suscetibilidade a escorregamentos rasos da bacia do Rio Gurutuba**. 2019. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/8/8135/tde-11122019-171423/>>.

CARRARA, A. et al. GIS techniques and statistical models in evaluating landslide

hazard. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 16, n. 5, p. 427–445, 1991.

CASTELLANOS ABELLA, E. A.; VAN WESTEN, C. J. Qualitative landslide susceptibility assessment by multicriteria analysis: A case study from San Antonio del Sur, Guantánamo, Cuba. **Geomorphology**, v. 94, n. 3–4, p. 453–466, 2008.

CEARÁ, S. E. do M. A. **Reestruturação e atualização do mapeamento do projeto Zoneamento Ecológico-Econômico do Ceará - zona costeira e unidades de conservação costeiras - Relatório final de caracterização ambiental**, 2016. .

CEREDA JUNIOR, A.; RÖHM, S. A. Analysis of environmental fragility using multicriteria analysis (MCE) for integrated landscape assessment. **Journal of Urban and Environmental Engineering**, v. 8, n. 1, p. 28–37, 2014.

CHAE, B.-G. B.-G. et al. Landslide prediction, monitoring and early warning: a concise review of state-of-the-art. **Geosciences Journal**, v. 21, n. 6, p. 1033–1070, 2017. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s12303-017-0034-4>><https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0012825217302209>>.

CHEN, T.; NIU, R.; JIA, X. A comparison of information value and logistic regression models in landslide susceptibility mapping by using GIS. **Environmental Earth Sciences**, v. 75, n. 10, p. 867, 10 maio 2016. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s12665-016-5317-y>>.

CHUNG, C.-J. F.; FABBRI, A. G. Validation of Spatial Prediction Models for Landslide Hazard Mapping. **Natural Hazards**, v. 30, n. 3, p. 451–472, 2003.

CHUNG, C. F.; FABBRI, A. G. Probabilistic Prediction Models for Landslide Hazard Mapping. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 65, n. 12, p. 1389–1399, 1999.

CIURLEO, M.; CALVELLO, M.; CASCINI, L. Susceptibility zoning of shallow landslides in fine grained soils by statistical methods. **Catena**, v. 139, p. 250–264, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2015.12.017>>.

CIURLEO, M.; CASCINI, L.; CALVELLO, M. A comparison of statistical and deterministic methods for shallow landslide susceptibility zoning in clayey soils. **Engineering Geology**, v. 223, n. December 2016, p. 71–81, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.04.023>>.

COELHO NETTO, A. L. et al. January 2011: The extreme landslide disaster in Brazil. In: *Landslide Science and Practice: Risk Assessment, Management and Mitigation, Anais...* 2011.

COHEN, J. A coefficient of agreement for nominal scales. **Educational and Psychological Measurement**, v. 20, n. 1, p. 37–46, 1960.

COROMINAS, J. et al. Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v. 73, n. 2, p. 209–263, 2014.

CROZIER, M. J. **Landslides: Causes, Consequences and Environment**. Londres: Routledge London & New York, 1986.

CRUZ, O. A Serra do Mar e o litoral na área de Caraguatatuba - SP. **Contribuição à geomorfologia litorânea tropical**. 1974. 1974.

DE PLOEY, J.; CRUZ, O. Landslides in the Serra do Mar, Brazil. **Catena**, v. 6, p. 111–122, 1979.

DIAS, H. C. et al. Avaliação da Suscetibilidade a Escorregamentos Rasos com Base na Aplicação de Estatística Bivariada: Resultados Preliminares. **Geography Department University of Sao Paulo**, n. September, p. 34–42, 2018.

DIAS, H. C. **Modelagem da suscetibilidade a escorregamentos rasos com base em análises estatísticas**. 2019. Dissertação (Mestrado - Geografia Física). Departamento de Geografia. Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas. Universidade de São Paulo, 2019.

DIAS, H. C.; DIAS, V. C.; VIEIRA, B. C. Condicionantes Morfológicos e Geológicos dos Escorregamentos Rasos na Bacia do Rio Santo Antônio, Caraguatatuba/SP. **Geography Department University of Sao Paulo**, v. 8, n. spe, p. 157, 2017. Disponível em: <<http://www.revistas.usp.br/rdg/article/view/132714>>.

DIETRICH, W. E.; MONTGOMERY, D. R. SHALSTAB: a digital terrain model for mapping shallow landslide potential. **NCASI (National Council of the Paper Industry for Air and Stream Improvement)**., p. 29, 1998.

DONHA, A. G.; SOUZA, L. C. de P.; SUGAMOSTO, M. L. Determinação da fragilidade ambiental utilizando técnicas de suporte à decisão e SIG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 1, p. 175–181, 2006.

FAWCETT, T. An introduction to ROC analysis. **Pattern Recognition Letters**, v. 27, n. 8, p. 861–874, 2006.

FERNANDES, N. F. et al. Condicionantes Geomorfológicos dos Deslizamentos nas Encostas: Avaliação de Metodologias e Aplicação de Modelo de Previsão de Áreas Susceptíveis. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 2, n. 1, 2001.

FERNANDES, N. F. et al. Topographic controls of landslides in Rio de Janeiro: Field evidence and modeling. **Catena**, v. 55, n. 2, p. 163–181, 2004.

FERNANDES, N. F.; AMARAL, C. P. Movimentos de massa: uma abordagem geológico-geomorfológica. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. (Ed.). **Geomorfologia e Meio Ambiente**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1996. p. 123–194.

FLORIANI, N. et al. Avaliação da fragilidade geossistêmica de uma microbacia sobre geologia cárstica: Potencial e Limitações. **RA'E GA - O Espaço Geográfico em Análise**, n. 11, p. 115–127, 2006.

FOLADOR, R. M.; SILVEIRA, C. T.; FIORI, A. P. Cálculo da Probabilidade e Quantificação do Volume de Material Suscetível a Escorregamentos - Bacia do Rio Jacaré, Morretes - PR. **Boletim Paranaense de Geociências**, v. 74, n. 1, p. 47–56, 2018.

FONSECA, A. P. et al. Influência do teor de mica na resistência ao cisalhamento residual em taludes de solos saprolíticos de gnaiss. **IV COBRAE - Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas**, p. 205–212, 2005.

FRATTINI, P.; CROSTA, G.; CARRARA, A. Techniques for evaluating the performance of landslide susceptibility models. **Engineering Geology**, v. 111, n. 1–4, p. 62–72, 2010.

FRESSARD, M.; THIERY, Y.; MAQUAIRE, O. Which data for quantitative landslide susceptibility mapping at operational scale? Case study of the Pays d'Auge plateau hillslopes (Normandy, France). **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 14, n. 3, p. 569–588, 2014.

FROUDE, M. J.; PETLEY, D. N. Global fatal landslide occurrence 2004 to 2016. **Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions**, n. 2012, p. 1–44, 2018.

FUNDAÇÃO FLORESTAL, F. **Plano de Manejo APA Várzea do rio Tietê**São Paulo, 2013. .

GAO, J. Identification of topographic settings conducive to landsliding from Nelson County, Virginia, U.S.A. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 18, p. 579–591, 1993.

GARÓFALO, D. T.; FERREIRA, M. C. Mapeamento de fragilidade ambiental por meio de análise geoespacial: uma aplicação na alta bacia dos rios Piracicaba e Sapucaí-Mirim, APA Fernão Dias, MG. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 29, n. 2015, p. 212–245, 2015.

GAYOSO, R. C. **Fragilidade Ambiental e Vulnerabilidade Social para análise integrada do espaço geográfico : bacia hidrográfica no Jardim Ângela (São Paulo-SP)**. 2014. Dissertação (Mestrado em Geografia Física). Departamento de Geografia. Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2014.

GERSCOVICH, D. M. S.; VARGAS, E. A.; CAMPOS, T. M. P. On the evaluation of unsaturated flow in a natural slope in Rio de Janeiro , Brazil. **Engineering Geology**, v. 88, p. 23–40, 2006.

GLADE, T.; CROZIER, M. J. The Nature of Landslide Hazard and Impact. In: ANDERSON, M. G.; CROZIER, M. J.; GLADE, T. (Ed.). **Landslide Hazard and Risk**. Chichester: John Wiley and Sons, 2005. p. 43–74.

GOETZ, J. N.; GUTHRIE, R. H.; BRENNING, A. Forest harvesting is associated with increased landslide activity during an extreme rainstorm on Vancouver Island, Canada. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 15, n. 6, p. 1311–1330, 2015.

GOMES, L. A.; GRAMANI, M. F. **Relato de vistoria técnica - São Luís do Paraitinga**. [s.l: s.n.].

GOUVEIA, I. C. M. et al. Contribuição ao planejamento de recursos hídricos em bacia hidrográfica: Geomorfologia e fragilidade geoambiental da UGRH Paranapanema. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 27, p. 21–46, 2014.

GRAMANI, M. F. A corrida de massa no Córrego Guarda-mão, município de Itaoca (SP): Impactos e observações de campo. In: 15º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, 11, **Anais...**2015.

GREENWAY, D. R. Vegetation and slope stability. In: ANDERSON, M. G.;

RICHARDS, K. S. (Ed.). **Slope Stability**. Chichester, Reino Unido: Wiley, 1987. p. 187–230.

GROHMANN, C. H. Evaluation of TanDEM-X DEMs on selected Brazilian sites: Comparison with SRTM, ASTER GDEM and ALOS AW3D30. **Remote Sensing of Environment**, v. 212, n. September 2017, p. 121–133, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.04.043>>.

GRUBER, S.; HUGGEL, C.; PIKE, R. Modelling mass movements and landslide susceptibility. **Developments in Soil Science**, v. 33, n. C, p. 527–550, 2009.

GUERRA, A. J. T.; BOTELHO, R. G. M. Características e Propriedades dos solos relevantes para os estudos pedológicos e análise de processos erosivos. **Anuário do Instituto de Geociências**, vol. v. 19, p. 93–114, 1996.

GUNS, M.; VANACKER, V. Shifts in landslide frequency-area distribution after forest conversion in the tropical Andes. **Anthropocene**, v. 6, p. 75–85, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ancene.2014.08.001>>.

GUTHRIE, R. H. The effects of logging on frequency and distribution of landslides in three watersheds on Vancouver Island, British Columbia. **Geomorphology**, v. 43, n. 3–4, p. 273–292, 2002.

GUZZETTI, F. et al. Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. **Geomorphology**, v. 31, n. 1–4, p. 181–216, dez. 1999. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169555X99000781>>.

GUZZETTI, F. et al. Estimating the quality of landslide susceptibility models. **Geomorphology**, v. 81, n. 1–2, p. 166–184, 2006.

HASUI, Y. et al. **Geologia da Região Administrativa 3 (Vale do Paraíba) e parte da Região Administrativa 2 (Litoral) do Estado de São Paulo**. 1978a. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S/A - IPT (Monografias IPT, 1), 1978.

HASUI, Y. et al. **Geologia da Folha de São José dos Campos - SP, SF-23-Y-D-II (Anexo mapa geológico em escala 1:100.000)**. 1978b. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S/A - IPT (Monografias IPT, 2), 1978.

HENRIQUES, C. da S. **Landslide Susceptibility Evaluation and Validation at a**

Regional Scale. 2014. Doutorado em Geografia Física. Instituto de Geografia e Ordenamento do Território. Universidade de Lisboa, 2014.

HORTA, I. T. L. G. **Análise de impactos pluviais em São Luiz do Paraitinga - SP/Brasil.** 2017. Universidade de São Paulo, 2017.

HUNGR, O.; LEROUEIL, S.; PICARELLI, L. The Varnes classification of landslide types, an update. **Landslides**, v. 11, n. 2, p. 167–194, 2014.

JADE, S.; SARKAR, S. Statistical models for slope instability classification. **Engineering Geology**, v. 36, n. 1–2, p. 91–98, 1993.

JENKS, G. F. Optimal data classification for choropleth maps. **Geography Department Occasional Paper**, v. 2 2, 1977.

KAWAKUBO, F. S. et al. Caracterização empírica da fragilidade ambiental utilizando geoprocessamento. In: XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, **Anais...**2005. Disponível em: <http://marte.dpi.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2004/11.19.16.10/doc/2203.pdf>.

KOBIYAMA, M. et al. Debris flow occurrences in Rio dos Cedros, Southern Brazil: Meteorological and geomorphic aspects. **WIT Transactions on Engineering Sciences**, v. 67, p. 77–88, 2010.

KRIEGER, G. et al. TanDEM-X: A radar interferometer with two formation-flying satellites. **Acta Astronautica**, v. 89, p. 83–98, ago. 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.actaastro.2013.03.008>.

LACASSE, S.; NADIM, F.; KALSNES, B. Living with landslide risk. **Geotechnical Engineering**, v. 41, n. 4, 2009.

LACERDA, W. A. Landslide initiation in saprolite and colluvium in southern Brazil: Field and laboratory observations. **Geomorphology**, v. 87, n. 3, p. 104–119, 2007.

LANDIS, J. R.; KOCH, G. G. The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data Published by: International Biometric Society Stable URL: <http://www.jstor.org/stable/2529310>. **Biometrics**, v. 33, n. 1, p. 159–174, 1977.

LIN, C. C.; GRAMANI, M. F.; CAMPOS, A. B. Levantamento das Cicatrizes de Deslizamentos na Bacia do Rio Gurutuba (SP) e Correlações com Parâmetros Físicos.

XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, p. 8, 2016.

LISTO, F. de L. R.; CARVALHO VIEIRA, B. Mapping of risk and susceptibility of shallow-landslide in the city of São Paulo, Brazil. **Geomorphology**, v. 169–170, p. 30–44, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.01.010>>.

MARTINS, T. D. et al. Análise Dos Parâmetros Morfológicos E Os Escorregamentos Rasos Na Serra Do Mar, Paraná. **Caminhos de Geografia**, v. 18, n. 63, p. 223–239, 2017.

MASSA, E. M.; ROSS, J. L. S. Aplicação De Um Modelo De Fragilidade Ambiental Relevo-Solo Na Serra Da Cantareira, Bacia Do Córrego Do Bispo, São Paulo-Sp. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 24, n. 2012, p. 57–79, 2012. Disponível em: <<http://www.revistas.usp.br/rdg/article/view/52754>>.

MCCOLL, S. T. Chapter 2 - Landslide Causes and Triggers. In: SHRODER, J. F.; DAVIES RISKS AND DISASTERS, T. B. T.-L. H. (Ed.). Boston: Academic Press, 2015. p. 17–42.

MEIS, M. R. M.; SILVA, J. X. Considerações geomorfológicas a propósito dos movimentos de massa ocorridos no Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 30, n. 1, 1968.

MERGILI, M. et al. A strategy for GIS-based 3-D slope stability modelling over large areas. **Geoscientific Model Development**, v. 7, n. 6, p. 2969–2982, 2014.

MICHEL, G. P.; KOBIYAMA, M.; GOERL, R. F. Comparative analysis of SHALSTAB and SINMAP for landslide susceptibility mapping in the Cunha River basin , southern Brazil. **Journal of Soils and Sediments**, v. 14, p. 1266–1277, 2014.

MONTGOMERY, D. R.; DIETRICH, W. E. A physically based model for the topographical control on shallow landsliding. **Water Resources Research**, v. 30, n. 4, p. 1153–1171, 1994.

NERY, T. D.; VIEIRA, B. C. Susceptibility to shallow landslides in a drainage basin in the Serra do Mar, São Paulo, Brazil, predicted using the SINMAP mathematical model. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v. 74, n. 2, p. 369–378, 2015.

OLIVEIRA, A. et al. Influence of Digital Elevation Models on Landslide Susceptibility with Logistic Regression Model. **Geography Department University of Sao Paulo**, v.

36, p. 33–47, 2018.

OLIVEIRA, M. R. P. de. **Análise de parâmetros morfológicos e litoestruturais e sua relação com escorregamentos no Planalto Paraitinga - Paraibuna - SP.** 2019. Dissertação (Mestrado - Geografia Física). Departamento de Geografia. Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/8/8135/tde-07112019-181738/>>.

OLIVEIRA, M. R. P. de; VIEIRA, B. C.; ROSS, J. L. S. Suscetibilidade Morfológica e Geológica aos Escorregamentos no Planalto de Paraitinga-Paraibuna (SP). **Revista do Departamento de Geografia**, v. Especial, p. 93–106, 2018. Disponível em: <<https://www.revistas.usp.br/rdg/article/view/148486>>.

OLIVEIRA, S. C. et al. Integration of landslide susceptibility maps for land use planning and civil protection emergency management. In: **Advancing Culture of Living with Landslides**. [s.l: s.n.]p. 543–553.

PADILHA, C. dos S. **Correlação entre a cobertura vegetal e os escorregamentos em São Luiz do Paraitinga/SP.** 2019. Trabalho de Graduação Individual (TGI). Departamento de Geografia. Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas. Universidade de São Paulo, 2019.

PEREIRA, S.; ZÊZERE, J. L.; BATEIRA, C. V. D. M. Technical Note : Assessing predictive capacity and conditional independence of landslide predisposing factors for shallow landslide susceptibility models. **Natural Hazards and Earth System Science**, v. 12, p. 979–988, 2012.

PETRI, S.; SUGUIO, K. Características granulométricas dos materiais de escorregamentos de Caraguatatuba, São Paulo, como subsídio para o estudo da sedimentação neoceno-zóica do sudeste brasileiro. In: 25º Congresso Brasileiro de Geologia, São Paulo. **Anais...** São Paulo: 1971.

PETRONE, P. A região de São Luiz do Paraitinga. **Revista Brasileira de Geografia**, v. 1, n. 3, p. 3–99, 1959.

PETSCHKO, H. et al. Assessing the quality of landslide susceptibility maps - Case study Lower Austria. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 14, n. 1, p. 95–118, 2014.

PINESE JÚNIOR., J. F.; RODRIGUES, S. C. O Método De Análise Hierárquica – AHP – Como Auxílio Na Determinação Da Vulnerabilidade Ambiental Da Bacia Hidrográfica Do Rio Piedade (MG). **Revista do Departamento de Geografia**, v. 23, n. 2012, p. 4–26, 2012. Disponível em:

<<http://citrus.uspnet.usp.br/rdg/ojs/index.php/rdg/article/view/117/364>>.

PISANO, L. et al. Variations in the susceptibility to landslides, as a consequence of land cover changes: A look to the past, and another towards the future. **Science of the Total Environment**, v. 601–602, p. 1147–1159, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.231>>.

POZZOBON, M.; SILVEIRA, C. T. da; CURCIO, G. R. Landslides Susceptibility Analysis in Blumenau, Southern Brazil: a Probabilistic Approach. **International Journal of Erosion Control Engineering**, v. 11, n. 3, p. 63–72, 2019.

QUINN, P. et al. The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models. **Hydrological Processes**, 1991.

REICHENBACH, P. et al. A review of statistically-based landslide susceptibility models. **Earth-Science Reviews**, v. 180, p. 60–91, 1 maio 2018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0012825217305652>>. Acesso em: 17 ago. 2018.

REMONDO, J. et al. Validation of landslide susceptibility maps; examples and applications from a case study in Northern Spain. **Natural Hazards**, v. 30, p. 437–449, 2003.

RICCOMINI, C. **O Rift Continental do Sudeste do Brasil**. 1989. Tese (Doutorado - Geologia Sedimentar). Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 1989.

RICCOMINI, C.; SANT'ANNA, L. G.; FERRARI, A. I. Evolução Geológica do Rift Continental do Sudeste do Brasil. In: MANTESSO-NETO, V.; BARTORELLI, A.; CARNEIRO, C.D.R.; BRITO-NEVES, B. B. (Ed.). **Geologia do Continente Sul Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida**. São Paulo: Becca, 2004. p. 383–405.

ROSA, M. R.; ROSS, J. L. S. Aplicação de SIG na geração de cartas de fragilidade. **Revista do Departamento de Geografia**, p. 77–106, 1999.

ROSS, J. L. S. **Geomorfologia: Ambiente e Planejamento**. São Paulo: Contexto, 1990.

ROSS, J. L. S. Análise Empírica Da Fragilidade Dos Ambientes Naturais Antropizados. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 8, p. 63–74, 1994. Disponível em: <<http://www.revistas.usp.br/rdg/article/view/47327>>.

ROSS, J. L. S.; JUNQUEIRA, L. S.; SANTOS, R. P. MORFODINÂMICA : SERRA DO MAR - BRASIL. In: VI Congresso Iberoamericano de Estudios Territoriales y Ambientales, **Anais...**2014.

ROSS, J. L. S.; MOROZ, I. C. Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 10, p. 41–58, 1996. Disponível em: <<http://www.revistas.usp.br/rdg/article/view/53703>>.

SALGADO, J. C. R. S. S. **Avaliação e modelação da suscetibilidade a movimentos de vertente superficiais translativos em Nova Friburgo**. 2013. Dissertação (Mestrado). Departamento de Geografia, Faculdade de Letras. Universidade do Porto, 2013.

SCHIAVO, B. N. de V. et al. Caracterização da fragilidade ambiental de uma bacia hidrográfica urbana no município de Santa Maria - RS. **REGET/UFSM**, v. 20, n. 1, p. 464–474, 2016.

SCHMALTZ, E. M.; STEGER, S.; GLADE, T. The influence of forest cover on landslide occurrence explored with spatio-temporal information. **Geomorphology**, v. 290, n. December 2016, p. 250–264, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.04.024>>.

SCHMIDT, K. M. et al. The variability of additional root reinforcement as an influence on shallow landslides susceptibility in the Oregon Coast Range. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 38, p. 995–1024, 2001.

SEIBERT, J.; STENDAHL, J.; SØRENSEN, R. Topographical influences on soil properties in boreal forests. **Geoderma**, v. 141, n. 1–2, p. 139–148, 2007.

SELBY, M. J. **Hillslope Materials and Processes**. Second Edi ed. Oxford: Oxford University Press, 1993.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL - CPRM; INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS - IPT S/A. **Carta de Suscetibilidade a Movimentos Gravitacionais de Massa e Inundações - Município de São Luís do Paraitinga/SP**. 2014. Escala

1:50.000, 2014.

SHARPE, C. F. S. **Landslides and related phenomena: a study of mass-movements of soil and rock**. [s.l.] Columbia University Press, 1938.

SOETERS, R.; VAN WESTEN, C. J. Slope instability recognition, analysis, and zonation. **Landslides: Investigation and Mitigation**, v. Special Re, n. January 1996, p. 129–177, 1996.

SPÖRL, C. **Metodologia para elaboração de modelos de fragilidade ambiental utilizando redes neurais**. 2007. Tese (Doutorado em Geografia Física). Departamento de Geografia. Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas. Universidade de São Paulo. São Paulo., 2007.

SPÖRL, C.; CASTRO, E.; LUCHIARI, A. Aplicação de redes neurais artificiais na construção de modelos de fragilidade ambiental. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 21, n. 2011, p. 113–135, 2011. Disponível em: <<http://www.revistas.usp.br/rdg/article/view/47233>>.

SPÖRL, C.; ROSS, J. L. S. Análise Comparativa da Fragilidade Ambiental com Aplicação de Três Modelos. **GEOUSP - Espaço e Tempo**, n. 15, p. 39–49, 2004.

STABILE, R. A.; COLÂNGELO, A. C. Estudo pluviométrico dos escorregamentos deflagrados no verão de 2009/2010 no planalto do Paraitinga (SP). In: **Os Desafios da Geografia Física na Fronteira do Conhecimento**. [s.l.] INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS - UNICAMP, 2017. p. 3878–3889.

STEGER, S. et al. Exploring discrepancies between quantitative validation results and the geomorphic plausibility of statistical landslide susceptibility maps. **Geomorphology**, v. 262, p. 8–23, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.03.015>>.

STEGER, S.; KOFLER, C. **Statistical Modeling of Landslides**. [s.l.] Elsevier Inc., 2019.

TATIZANA, C. et al. Modelamento numérico da análise de correlação entre chuvas e escorregamentos aplicado às encostas da Serra do Mar no município de Cubatão. (v. . ABGE, Ed.) In: Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia., São Paulo. **Anais...** São Paulo: 1987.

TAYLOR, P. J. **Quantitative methods in geography: An introduction to Spatial**

Analysis. First edit ed. [s.l: s.n.]

TRICART, J. **Ecodinâmica**. Rio de Janeiro: IBGE. Superintendência de Recursos Naturais e Meio Ambiente, 1977.

TROMBETA, L. R. et al. Análise Da Fragilidade Potencial E Emergente Do Relevo Da Unidade De Gerenciamento De Recursos Hídricos Pontal Do Paranapanema , São Paulo , Brasil. **Caderno Prudentino de Geografia**, v. Especial, n. 36, p. 159–173, 2014.

VAKHSHOORI, V.; ZARE, M. Landslide susceptibility mapping by comparing weight of evidence, fuzzy logic, and frequency ratio methods. **Geomatics, Natural Hazards and Risk**, v. 7, n. 5, p. 1731–1752, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1080/19475705.2016.1144655>>.

VAKHSHOORI, V.; ZARE, M. Is the ROC curve a reliable tool to compare the validity of landslide susceptibility maps? **Geomatics, Natural Hazards and Risk**, v. 9, n. 1, p. 249–266, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/19475705.2018.1424043>>.

VALERIANO, M. D. M.; CARVALHO JÚNIOR, O. A. de. Geoprocessamento de Modelos Digitais de Elevação para Mapeamento da Curvatura Horizontal em Microbacias. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 4, n. 1, p. 17–29, 2003.

VAN WESTEN, C. J. Background (Chapter 1). In: **Training Package for Geographic Information Systems in Slope Instability Zonation**. Enschede: ITC Publication number 15, 1993. p. 3–24.

VAN WESTEN, C. J. Geo-information tools for landslide risk assessment: an overview of recent developments. In: **Landslides: Evaluation and Stabilization**, Proceedings of the 9th International Symposium on Landslides, **Anais...**2004.

VAN WESTEN, C. J.; CASTELLANOS, E.; KURIAKOSE, S. L. Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: An overview. **Engineering Geology**, v. 102, n. 3–4, p. 112–131, dez. 2008. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.010>>.

VAN WESTEN, C. J.; VAN ASCH, T. W. J.; SOETERS, R. Landslide hazard and risk zonation—why is it still so difficult? **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v. 65, n. 2, p. 167–184, 15 maio 2006. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s10064-005-0023-0>>.

VIEIRA, B. C. **Previsão de escorregamentos translacionais rasos na Serra do Mar (SP) a partir de modelos matemáticos em bases físicas**. 2007. Tese (Doutorado - Geografia Física). Departamento de Geografia. Instituto de Geociências. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007.

WOLLE, C. M. et al. **Peculiarities of geotechnical behaviour of tropical lateritic and saprolitic soils - Progress Report (1982-1985)**. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica de Solos (ABMS), 1985.

WOLLE, C. M.; CARVALHO, C. S. Taludes Naturais. In: FALCONI, F. F.; JUNIOR, A. N. (Ed.). **Solos do Litoral de São Paulo**. São Paulo: ABMS, 1994.

WOLLE, C. M.; HACHICH, W. Rain-induced landslides in Southeastern Brazil. In: XII International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: 1989.

XAVIER, M. O. **Mapeamento da suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa utilizando a análise estatística do Valor Informativo aplicada ao distrito sede da cidade histórica de Ouro Preto-MG**. 2018. Universidade Federal de Ouro Preto, 2018.

YAMAGISHI, H. Identification and Mapping of Landslides. In: **GIS Landslide**. Tokyo: Springer Japan, 2017. p. 3–9.

YIN, K. L.; YAN, T. Z. Statistical prediction models for slope instability of metamorphosed rocks. (L. Bonnard, Ed.) In: Fifth International Symposium on Landslides, Lausanne. **Anais...** Lausanne: Balkema, Rotterdam, 1988.

ZALÁN, P. V.; OLIVEIRA, J. A. B. Origem e evolução estrutural do Sistema de Rittes Cenozóicos do Sudeste do Brasil. **Boletim de Geociências da Petrobras**, v. 13, n. 2, p. 269–300, 2005.

ZÊZERE, J. L. **Movimentos de vertente e perigosidade geomorfológica na Região Norte de Lisboa**. 1997. Tese (Doutorado em Geografia Física). Universidade de Lisboa, 1997.

ZÊZERE, J. L. Landslide susceptibility assessment considering landslide typology. A case study in the area north of Lisbon (Portugal). **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 2, n. 1–2, p. 73–82, 2002.

ZÊZERE, J. L. et al. Mapping landslide susceptibility using data-driven methods. **Science of the Total Environment**, v. 589, p. 250–267, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.188>>.