

Revisões de Literatura da Geomorfologia Brasileira



caliandra



ORGANIZADORES

Osmar Abílio de Carvalho Júnior
Maria Carolina Villaça Gomes
Renato Fontes Guimarães
Roberto Arnaldo Trancoso Gomes



CONSELHO EDITORIAL

Membros internos:

Prof. Dr. André Cabral Honor (HIS/UnB) - **Presidente**

Prof. Dr. Herivelto Pereira de Souza (FIL/UnB)

Prof^ª Dr^ª Maria Lucia Lopes da Silva (SER/UnB)

Prof. Dr. Rafael Sânzio Araújo dos Anjos (GEA/UnB)

Membros externos:

Prof^ª Dr^ª Ângela Santana do Amaral (UFPE)

Prof. Dr. Fernando Quiles García (Universidad Pablo de Olavide - Espanha)

Prof^ª Dr^ª Ilía Alvarado-Sizzo (UniversidadAutonoma de México)

Prof^ª Dr^ª Joana Maria Pedro (UFSC)

Prof^ª Dr^ª Marine Pereira (UFABC)

Prof^ª Dr^ª Paula Vidal Molina (Universidad de Chile)

Prof. Dr. Peter Dews (University of Essex - Reino Unido)

Prof. Dr. Ricardo Nogueira (UFAM)



A UnB quem faz
é a gente

Organizadores: Osmar Abílio de Carvalho Júnior
Maria Carolina Villança Gomes
Renato Fontes Guimarães
Roberto Arnaldo Trancoso Gomes

Título: Revisões de Literatura da Geomorfologia Brasileira

Volume: 1

Local: Brasília

Editor: Selo Caliandra

Ano: 2022

Parecerista: João Cândido André da Silva Neto

Capa: Luiz H S Cella



Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International (CC BY-NC-ND 4.0)

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade de Brasília
Heloiza Faustino dos Santos - CRB 1/1913

R454 Revisões de literatura da geomorfologia brasileira [recurso eletrônico] / organizadores Osmar Abílio de Carvalho Júnior ... [et al.]. – Brasília : Universidade de Brasília, 2022.
1057 p. : il.

Inclui bibliografia.

Modo de acesso: World Wide Web:

<<http://caliandra.ich.unb.br/>>.

ISBN 978-65-86503-85-2.

1. Geomorfologia - Brasil. I. Carvalho Júnior, Osmar Abílio de.

CDU 551.4

Lista de autores

Abner Monteiro Nunes Cordeiro
Adão Osdayan Cândido de Castro
Alberto Oliva
Alex de Carvalho
Ana Camila Silva
André Augusto Rodrigues Salgado
André Luiz Carvalho da Silva
André Paulo Ferreira da Costa
Antônio Carlos de Barros Corrêa
Antonio José Teixeira Guerra
Antônio Pereira Magalhães Junior
Antonio Rodrigues Ximenes Neto
Archimedes Perez Filho
Beatriz Abreu Machado
Breno Ribeiro Marent
Bruno Venancio da Silva
Carlos de Oliveira Bispo
Carmélia Kerolly Ramos de Oliveira
César Augusto Chicarino Varajão
Claudia Rakel Pena Pereira
Cristiano da Silva Rocha
Cristina Helena Ribeiro Augustin
Daniel Françoso de Godoy
Daniel Peifer
Danielle Lopes de Sousa Lima
Danilo Vieira dos Santos
David Hélio Miranda de Medeiros
Delano Nogueira Amaral
Dirce Maria Antunes Suertegaray
Edison Fortes
Edivando Vitor do Couto
Eduardo Souza de Moraes
Edwilson Medeiros dos Santos
Éric Andrade Rezende
Fabiana Souza Ferreira
Fábio Perdigão Vasconcelos
Fabrizio de Luiz Rosito Listo
Fabrizio do Nascimento Garritano
Felipe Gomes Rubira
Flávio Rodrigues do Nascimento
Francisco Dourado
Francisco Edmar de Sousa Silva
Francisco Leandro de Almeida Santos
Frederico de Holanda Bastos
Gisele Barbosa dos Santos
Giselle Ferreira Borges
Guilherme Borges Fernandez
Hugo Alves Soares Loureiro
Idjarrury Gomes Firmino
Isabel Cristina Moroz-Caccia Gouveia
Jáder Onofre de Moraes
Jémison Mattos dos Santos
João Paulo de Carvalho Araújo
José Fernando Rodrigues Bezerra
Juliana Sousa Pereira
Julio Cesar Paisani
Jurandyr L. Sanches Ross
Karine Bueno Vargas
Kleython de Araújo Monteiro
Laryssa Sheydder de Oliveira Lopes
Leonardo dos Santos Pereira
Leonardo José Cordeiro Santos
Letícia Augusta Faria de Oliveira
Lidriana de Souza Pinheiro,
Lígia Padilha Novak
Luiz Fernando de Paula Barros
Manoel do Couto Fernandes
Marcel Hideyuki Fumiya,
Marcelo Martins de Moura Fé
Marcos César Pereira Santos
Maria Bonfim Casemiro
Mariana Silva Figueiredo
Marli Carina Siqueira Ribeiro
Martim de Almeida Braga Moulton
Michael Vinicius de Sordi
Mônica dos Santos Marçal
Neiva Barbalho de Moraes
Nelson Ferreira Fernandes
Nelson Vicente Lovatto Gasparetto
Oswaldo Girão da Silva
Otávio Augusto de Oliveira Lima Barra
Otávio Cristiano Montanher
Paulo Cesar Rocha
Paulo de Tarso Amorim Castro
Paulo Roberto Silva Pessoa
Pedro Val
Peter Christian Hackspacher
Rafaela Soares Niemann
Raphael Nunes de Souza Lima
Roberto Marques Neto

Roberto Verdum
Rodrigo Vitor Barbosa Sousa
Rubson Pinheiro Maia
Sandra Baptista da Cunha
Sarah Lawall
Sérgio Cadena de Vasconcelos
Sérgio Murilo Santos de Araújo
Silvio Carlos Rodrigues
Silvio Roberto de Oliveira Filho
Simone Cardoso Ribeiro
Tania Cristina Gomes

Thais Baptista da Rocha
Thiago Gonçalves Pereira
Thiago Pereira Gonçalves
Thomaz Alvisi de Oliveira
Tulius Dias Nery
Úrsula de Azevedo Ruchkys
Vanda de Claudino-Sales
Vanessa Martins Lopes
Vinícius Borges Moreira
Vitor Hugo Rosa Biffi

PREFÁCIO

O presente livro consiste em um conjunto de revisões sobre os avanços teóricos e tecnológicos nos diversos temas da Geomorfologia. Concebido para estar em uma plataforma on-line com acesso gratuito, o livro destina-se aos cursos de graduação e pós-graduação que utilizam os conhecimentos geomorfológicos, incluindo Geografia, Geologia, Ecologia, Engenharia, Planejamento Territorial, entre outros. Para atender o escopo e o desafio imposto, a obra possui um total de 36 capítulos que congregam 111 pesquisadores das diversas regiões do Brasil, trazendo relatos relevantes de nossa paisagem e dos avanços alcançados pela Geomorfologia brasileira. Os capítulos do livro estão segmentados em contextos temáticos e geográficos de estudo, incluindo: dinâmica fluvial, ambientes costeiros, evolução de vertentes, micro relevo, ambientes cársticos, geomorfologia regional, geomorfologia estrutural; mapeamento geomorfológico, patrimônio natural, mitigação de riscos naturais; interações pedo-geomorfológicas, etnogeomorfologia, modelos numéricos, novas abordagens tecnológicas em geomorfologia. Além de abranger os conceitos e o estado da arte na análise dos processos e sistemas geomorfológicos, os capítulos realizam uma visão crítica dos diversos temas abordados.

Na última década, inúmeros avanços foram alcançados com o aumento da disponibilidade de dados de monitoramento da superfície terrestre, métodos computacionais e compartilhamento de experiências. A grande quantidade de dados e métodos resulta em novos desafios de análise e processamento na busca de respostas científicas dentro de uma apreciação crítica. A concepção desse livro integra revisões e discussões sobre essas novas abordagens teóricas, instrumentais e tecnológicas que passam a ter um fator primordial para estabelecer os novos rumos da ciência geomorfológica.

Dada a magnitude continental do nosso território, não é surpreendente que a paisagem brasileira seja evidenciada e detalhada em suas peculiaridades nos textos. Portanto, vários capítulos exploram e refletem a natureza distinta da paisagem e da biota brasileira, revelando os processos naturais e as perturbações antrópicas que alteram o meio ambiente e desencadeiam processos erosivos, movimento de massa, inundações, entre outros. Nesse contexto, as pesquisas aplicadas são extremamente oportunas devido à alta demanda para solução de problemas prementes e complexo de nossos ambientes e sociedade, necessitando continuamente de alternativas, novos conceitos, perspectivas tecnológicas e inovações metodológicas. Muitos capítulos abordam revisões sobre trabalhos aplicados na investigação geomorfológica e resolução de problemas, normalmente desencadeados por perturbações humanas com consequências variadas nos diferentes sistemas.

Os editores abnegaram a oportunidade de contribuir com capítulos para garantir a imparcialidade na seleção dos textos que compõe o livro. Por fim, os editores agradecem especialmente a União de Geomorfologia Brasileira e a todos os colaboradores que contribuíram com seus conhecimentos específicos para a elaboração dessa obra abrangente e de grande relevância para o conhecimento da Geomorfologia nacional.

Osmar Abílio de Carvalho Júnior
Maria Carolina Villaça Gomes
Renato Fontes Guimarães
Roberto Arnaldo Trancoso Gomes

SUMARIO

1. CONSIDERAÇÕES EPISTEMOLÓGICAS EM TORNO DA PESQUISA EM GEOMORFOLOGIA: DO PROJETO AO ARTIGO CIENTÍFICO

André Augusto Rodrigues Salgado
Alberto Oliva

----- 16

2. ARQUIVOS FLUVIAIS QUATERNÁRIOS NO INTERIOR CONTINENTAL: O CONTEXTO SERRANO DE MINAS GERAIS, BRASIL

Antônio Pereira Magalhães Junior
Luiz Fernando de Paula Barros
Alex de Carvalho
Letícia Augusta Faria de Oliveira

----- 39

3. PROCESSOS DE REORGANIZAÇÃO DA REDE DE DRENAGEM NO BRASIL

Breno Ribeiro Marent
Éric Andrade Rezende
Michael Vinícius de Sordi
André Augusto Rodrigues Salgado

----- 76

4. AVALIAÇÃO INTEGRADA DE SISTEMAS FLUVIAIS: SUBSÍDIO PARA IDENTIFICAÇÃO DE VALORES PATRIMONIAIS

Carmélia Kerolly Ramos de Oliveira
Paulo de Tarso Amorim Castro
Úrsula de Azevedo Ruchkys

----- 98

5. GEOMORFOLOGIA FLUVIAL E GESTÃO DE RISCO DE INUNDAÇÕES

Claudia Rakel Pena Pereira
Sandra Baptista da Cunha

----- 124

6. AJUSTAMENTO FLUVIAL À AGROPECUÁRIA, URBANIZAÇÃO E RESERVATÓRIO E ANÁLISE CIENTOMÉTRICA DO IMPACTO DESSAS ATIVIDADES NOS RIOS BRASILEIROS	
Eduardo Souza de Morais Otávio Cristiano Montanher	
-----	143
7. GEOMORFOLOGIA FLUVIAL DO BRASIL ASSOCIADA AO ATUAL CONTEXTO SOCIOAMBIENTAL	
Giselle Ferreira Borges Neiva Barbalho de Morais Ana Camila Silva Leonardo dos Santos Pereira Sarah Lawall	
-----	176
8. CONTROLE TECTONO-ESTRUTURAL DOS SISTEMAS DE DRENAGEM: REVISÃO LITERÁRIA E PROPOSTAS METODOLÓGICAS	
Idjarrury Gomes Firmino Karine Bueno Vargas Edison Fortes	
-----	212
9. GEOMORFOLOGIA FLUVIAL E GESTÃO DOS RIOS NO BRASIL	
Mônica dos Santos Marçal Adão Osdayan Cândido de Castro Raphael Nunes de Souza Lima	
-----	240
10. INUNDAÇÕES E CONCEITOS CORRELATOS: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E ANÁLISE COMPARATIVA.	
Rodrigo Vitor Barbosa Sousa Paulo Cesar Rocha	
-----	265
11. SISTEMAS LACUSTRES INTERIORES: AVANÇOS E TÉCNICAS DE ESTUDO	
Gisele Barbosa dos Santos Paulo de Tarso Amorim Castro	
-----	278

12. EVOLUÇÃO MORFODINÂMICA DE PLANÍCIES COSTEIRAS:
DO QUATERNÁRIO AOS EVENTOS ATUAIS

Guilherme Borges Fernandez
Thais Baptista da Rocha
Silvio Roberto de Oliveira Filho
Sérgio Cadena de Vasconcelos
André Luiz Carvalho da Silva
Thiago Gonçalves Pereira
Martim de Almeida Braga Moulton

----- 308

13. MORFOLOGIA COSTEIRA EM LITORAIS URBANOS

Otávio Augusto de Oliveira Lima Barra
Fábio Perdigão Vasconcelos
Cristiano da Silva Rocha
Maria Bonfim Casemiro
Danilo Vieira dos Santos
Francisco Edmar de Sousa Silva
Delano Nogueira Amaral

----- 351

14. DELTAS DOMINADOS POR ONDAS: TRAJETÓRIA CONCEITUAL,
DINÂMICA E EVOLUÇÃO A PARTIR DE EXEMPLOS DO COMPLEXO
DELTAICO DO RIO PARAÍBA DO SUL

Thaís Baptista da Rocha
Sérgio Cadena de Vasconcelos
André Paulo Ferreira da Costa
Beatriz Abreu Machado
Mariana Silva Figueiredo
Lígia Padilha Novak
Thiago Pereira Gonçalves
Guilherme Borges Fernandez

----- 381

15. REGISTROS DAS VARIAÇÕES DO NÍVEL RELATIVO DO MAR NO
LITORAL BRASILEIRO E AS IMPLICAÇÕES
PERANTE A MORFOGÊNESE DE SUPERFÍCIES GEOMORFOLÓGI-
CAS EM AMBIENTES COSTEIROS

Felipe Gomes Rubira
Archimedes Perez Filho

----- 410

16. VALES INCISOS SUBMERSOS DA PLATAFORMA
CONTINENTAL SEMIÁRIDA DO BRASIL

Antonio Rodrigues Ximenes Neto
Lidriana de Souza Pinheiro
David Hélio Miranda de Medeiros
Paulo Roberto Silva Pessoa
Jáder Onofre de Moraes

----- 445

17. GEOMORFOLOGIA EÓLICA CONTINENTAL E OS
CAMPOS DE DUNAS HOLOCÊNICAS DO PAMPA NO RIO
GRANDE DO SUL, BRASIL

Tania Cristina Gomes
Roberto Verdum

----- 471

18. EROSÃO POR VOÇOROCAS: ESTADO DA ARTE

Juliana Sousa Pereira
Silvio Carlos Rodrigues

----- 499

19. MONITORAMENTO DA EROSÃO HÍDRICA NO BRASIL:
DOS MÉTODOS MANUAIS AOS DIGITAIS

Hugo Alves Soares Loureiro
Antonio José Teixeira Guerra
José Fernando Rodrigues Bezerra
Leonardo dos Santos Pereira
Fabrizio do Nascimento Garritano

----- 526

20. MOVIMENTOS DE MASSA: ESTADO DA ARTE,
ESCALAS DE ABORDAGEM, ENSAIOS DE CAMPO E LABORATÓRIO
E DIFERENTES MODELOS DE PREVISÃO

Fabrizio de Luiz Rosito Listo
Tulius Dias Nery
Carlos de Oliveira Bispo
Fabiana Souza Ferreira
Edwilson Medeiros dos Santos

----- 560

21. MORFOGÊNESE DE MICRORRELEVOS SIMILARES
A MURUNDUS NA PAISAGEM
- Vinícius Borges Moreira
Archimedes Perez Filho
- 593
22. APLAINAMENTO NO NOROESTE DO PARANÁ:
DE MODELOS POLICÍCLICO À MORFOTECTÔNICA
QUATERNÁRIA
- Marcel Hideyuki Fumiya
Edivando Vitor do Couto
Leonardo José Cordeiro Santos
- 615
23. GEOMORFOLOGIA DO QUATERNÁRIO E
GEOARQUEOLOGIA: ASPECTOS CONCEITUAIS, METODOLÓGICOS
E APLICAÇÕES NO SUL DO BRASIL
- Vitor Hugo Rosa Biffi
Marcos César Pereira Santos
Julio Cesar Paisani
Nelson Vicente Lovatto Gasparetto
- 648
24. TERMOCRONOLOGIA APLICADA À EVOLUÇÃO
GEOMORFOLÓGICA DO NORDESTE SETENTRIONAL DO BRASIL:
UMA BREVE REVISÃO
- Francisco Leandro de Almeida Santos
Flávio Rodrigues do Nascimento
Peter Christian Hackspacher (In Memoriam)
Marli Carina Siqueira Ribeiro
Bruno Venancio da Silva & Daniel França de Godoy
- 677
25. A TAXONOMIA DO RELEVO E A CARTOGRAFIA
GEOMORFOLÓGICA REGIONAL
- Jurandyr L. Sanches Ross
Isabel Cristina Moroz-Caccia Gouveia
- 701

26.	RELEVOS GRANÍTICOS DO NORDESTE BRASILEIRO: UMA PROPOSTA TAXONÔMICA	
	Frederico de Holanda Bastos Danielle Lopes de Sousa Lima Abner Monteiro Nunes Cordeiro Rubson Pinheiro Maia	
	-----	733
27.	REVISITANDO OS MODELOS CLÁSSICOS DE EVOLUÇÃO DO RELEVO	
	Daniel Peifer Cristina Helena Ribeiro Augustin	
	-----	759
28.	SUPERFÍCIES GEOMORFOLÓGICAS E MODELOS CLÁSSICOS DE EVOLUÇÃO DO RELEVO	
	Karine Bueno Vargas Idjarrury Firmino Michael Vinicius de Sordi	
	-----	793
29.	A GEOMORFOLOGIA NOS ESTUDOS INTEGRADOS DA PAISAGEM: ENFOQUE EVOLUTIVO E DINÂMICO NA INTERPRETAÇÃO DOS SISTEMAS GEOMORFOLÓGICOS	
	Roberto Marques Neto Thomaz Alvisi de Oliveira	
	-----	813
30.	ESTADO DA ARTE DOS ESTUDOS GEOMORFOLÓGICOS NO NORDESTE BRASILEIRO: UMA SÍNTESE (E VÁRIAS TESES)	
	Vanda de Claudino-Sales Antonio Carlos Barros Côrrea Kleython de Araújo Monteiro Rubson Pinheiro Maia	
	-----	845
31.	AS SUPERFÍCIES DE EROSÃO DO “BRASIL ORIENTAL”	
	César Augusto Chicarino Varajão	
	-----	875

32.	ETNOGEOMORFOLOGIA - RELAÇÕES ENTRE POPULAÇÕES TRADICIONAIS E A PAISAGEM FÍSICA	
	Simone Cardoso Ribeiro Vanessa Martins Lopes Osvaldo Girão da Silva Antônio Carlos de Barros Corrêa	
	-----	886
33.	DESAFIOS E PERSPECTIVAS DAS PESQUISAS SOBRE O PATRIMÔNIO GEOMORFOLÓGICO NO BRASIL	
	Vanda de Claudino-Sales Laryssa Sheydder de Oliveira Lopes	
	-----	910
34.	USO DO LIDAR NA GEOMORFOLOGIA: APLICAÇÕES E DESAFIOS FUTUROS	
	João Paulo de Carvalho Araújo Rafaela Soares Niemann Francisco Dourado Manoel do Couto Fernandes Nelson Ferreira Fernandes	
	-----	927
35.	MODELOS NUMÉRICOS DE EVOLUÇÃO DO RELEVO (LEMS) E SUA IMPORTÂNCIA PARA ESTUDOS DE EVOLUÇÃO DA PAISAGEM	
	Nelson F. Fernandes Daniel Peifer Pedro Val	
	-----	953
36.	SOLO HISTÓRICO DA DESERTIFICAÇÃO NO BRASIL	
	Jémison Mattos dos Santos Sérgio Murilo Santos de Araújo Dirce Maria Antunes Suertegaray	
	-----	1000

37. GEOMORFOLOGIA ESTRUTURAL:
REVISITANDO TEORIAS, MÉTODOS E ESTUDOS
DE CASO NO NORDESTE BRASILEIRO

Frederico de Holanda Bastos
Abner Monteiro Nunes Cordeiro
Marcelo Martins de Moura Fé

----- 1029

20. MOVIMENTOS DE MASSA: ESTADO DA ARTE, ESCALAS DE ABORDAGEM, ENSAIOS DE CAMPO E LABORATÓRIO E DIFERENTES MODELOS DE PREVISÃO

Fabrizio de Luiz Rosito Listo¹, Tullius Dias Nery², Carlos de Oliveira Bispo³, Fabiana Souza Ferreira⁴ & Edwilson Medeiros dos Santos⁵

¹Docente do Departamento de Ciências Geográficas, Universidade Federal de Pernambuco; Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade Federal de Pernambuco. Avenida Acadêmico Hélio Ramos, s/n - Cidade Universitária, CEP: 50.740-530, Recife-PE
fabrizio.listo@ufpe.br

²Tecnologista do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais/Cemaden;
tullius.nery@cemaden.gov.br

³Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal de Pernambuco; carlos.bispo@ufpe.br

⁴Docente do Instituto Federal de São Paulo e Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal de Pernambuco; fabiana.souzaferreira@ufpe.br

⁵Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal de Pernambuco; edwilson.msantos@ufpe.br

Resumo: Na dinâmica de encostas, os movimentos de massa classificam-se como processos superficiais que implicam em um volume de solo e/ou rocha que podem se deslocar simultaneamente, caracterizando-se como um dos maiores processos de alteração e de desenvolvimento de novas formas, rampas coluviais, entre outras, especialmente em regiões declivosas. Contudo, no Brasil, a frequente ocorrência destes processos causa a devastação de moradias, gerando muitas perdas econômicas com vítimas letais e aumentando, anualmente, o número de áreas de risco. Assim, este capítulo abordará o estado da arte de movimentos de massa em diferentes escalas de abordagem e os principais métodos de previsão utilizados, tais como, inventários, modelos heurísticos e modelos determinísticos, além de ensaios de campo e de laboratório, realizados para obtenção de dados para uso em modelos preditivos.

Palavras-Chave: Movimentos de Massa; Escorregamentos; Inventários; Modelos Matemáticos.

Abstract: In slope dynamics, mass movements are classified as surface processes that imply a volume of soil and/or rock that may be simultaneously dislodged, being characterized as one of the largest processes of alteration and development of new forms, colluvium ramps, among others, especially in hilly regions. However, in Brazil, the frequent occurrence of such processes causes

the devastation of dwellings, generating many economic losses with fatal victims and increasing, on a yearly basis, the number of risk areas. Therefore, this chapter shall touch upon the state of the art in mass movements at different scales of approach and the main prediction methods used, such as, inventories, heuristic models and deterministic models, in addition to field and laboratory testing, carried out to obtain data to be used in predictive models.

Keywords: Mass Movements; Landslides; Inventories; Mathematical Models.

Tema: Dinâmica das Vertentes e Interações Pedogeomorfológicas

1. INTRODUÇÃO

Movimentos de massa classificam-se como processos superficiais que implicam em um volume de solo e/ou rocha que podem se deslocar simultaneamente, caracterizando-se como um dos maiores processos de alteração e de desenvolvimento de encostas, especialmente, em regiões montanhosas e íngremes. São processos atuantes na evolução de paisagens, mas que, ao mesmo tempo, podem causar perdas sociais e econômicas significativas (ZÁRUBA & MENCL, 1969; GUIDICINI & NIEBLE, 1984; SELBY, 1993).

A classificação dos movimentos de massa é a primeira etapa da análise científica para o adequado discernimento desses fenômenos. Classificações precursoras aconteceram entre 1875 e 1910, tendo em vista o comportamento da força de gravidade de forma direta ou indireta (VIEIRA, 2007). Sharpe (1938), no entanto, apresentou uma breve sistematização, por meio de releituras, destas primeiras tentativas de classificação dos processos. Contudo, o autor enfatizou, na época, a dificuldade de sistematização de dados, devido à existência de uma variedade de fatores e de suas complexidades associadas. O referido autor, ainda, fez considerações à classificação proposta por Terzaghi (1925), considerada a mais detalhada da época, na qual, os movimentos de massa foram organizados de acordo com princípios físicos.

Entretanto, conforme Guidicini & Nieble (1984), tal classificação foi considerada simplificada, passando a correlacionar a velocidade e o tipo do deslocamento com o conteúdo do material transportado, de acordo com o ambiente geomorfológico e climático. Em seguida, inúmeras classificações internacionais foram desenvolvidas, destacando-se Varnes (1978), Crozier (1986), Hutchinson (1986) e Selby (1993). No Brasil, sobressaem-se as classificações de Guidicini & Nieble (1984), IPT (1991) e Augusto Filho (1992). Na classificação de Selby (1993), por exemplo, o autor diferenciou os movimentos de massa conforme os seguintes parâmetros: mecanismo do movimento e velocidade, material, geometria da massa movimentada, modo de deformação e teor de água.

Movimentos de massa atuam esculpindo e modelando o relevo desde a origem da superfície da Terra e estabelecem circunstâncias para o progresso da vida. Contudo, a frequente ocorrência destes processos causa a destruição de moradias e demais estruturas,

soterramento de solos férteis, perdas humanas, entre outros, elevando, anualmente, o número de áreas de risco. Sidle *et al.*, (1985), Alexander (1993), Amaral (1997), Ayala (2002) e, Listo & Vieira (2012) verificaram que a repercussão de movimentos de massa nos países em desenvolvimento vincula-se, muitas vezes, a infortúnios humanos em áreas urbanas fortemente adensadas e saturadas, ao passo que, nos países desenvolvidos, são, fundamentalmente, prejuízos econômicos.

Segundo Brunsden & Prior (1984), Sidle *et al.*, (1985), Crozier (1986) e Fernandes *et al.*, (2004), tal fato pode ser explicado em função de maiores iniciativas de prevenção e de resiliência nos países desenvolvidos, enquanto nas principais metrópoles dos países mais pobres, os processos assumem proporções catastróficas, em razão de inúmeros desmatamentos, execução precária de taludes de aterro e de corte, acumulação de lixo e de detritos, modificações da drenagem fluvial, entre outras pressões antropogênicas desprovidas de um planejamento preventivo.

No Brasil, devido ao contexto sucessivo de Desastres Naturais, essencialmente no decorrer de chuvas torrenciais, instituiu-se no ano de 2012, a Lei Federal nº 12.608 (BRASIL, 2012), que estabeleceu a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil. Dentre diversas incumbências, tal política estabeleceu como encargo da União, estados e municipalidades, a utilização de providências para atenuação das situações de risco causadas por desastres, mormente, em terrenos geomorfologicamente declivosos.

Com o avanço dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG), surgiram diversos métodos para a análise da suscetibilidade e do risco a movimentos de massa, assumindo importância progressiva na literatura em Geomorfologia. O emprego de modelos matemáticos para a previsão de áreas instáveis, por exemplo, pode ser um recurso grandemente pragmático, simples e de moderado dispêndio no subsídio à minimização das situações desagradáveis causadas por tais processos. Ressaltam-se como exemplos, os mapas de inventários (ou análise de distribuição) baseados em modelagem probabilística, os métodos heurísticos (agregado de mapas temáticos), a aplicação de técnicas estatísticas, os modelos determinísticos em bases físicas, além de ensaios de campo e de laboratório, que serão melhor explicitados ao longo deste capítulo (CARRARA, *et al.*, 1995; VAN WESTEN *et al.*, 2008; GUZZETTI *et al.*, 2012).

2. TIPOLOGIAS DE MOVIMENTOS DE MASSA

Conforme as classificações de Augusto Filho (1992) e de Selby (1993), os movimentos de massa podem ser diferenciados em quatro grandes subtipos: rastejos (*creep*), escorregamentos *stricto sensu* (*slides*), quedas (*falls*) e corridas (*flows*).

O rastejo (*creep*) caracteriza-se por ser lento e contínuo, de poucos centímetros ao ano (cm/ano). Apresentam geometria indefinida, cuja massa em moção e a massa inerte são indiferenciadas (GUIDICINI & NIEBLE, 1984; AUGUSTO FILHO, 1992; MACIEL FILHO, 1997). De acordo com Guidicini & Nieble (1984), sua movimentação está associada à ação da gravidade e ao efeito da variação térmica, cujo processo de expansão e de contração resulta no deslocamento do material.

Wolle & Carvalho (1994) relataram que na Serra do Mar Paulista, por exemplo, existem três categorias de movimentos associados ao rastejo, relativos a meios diversos, tais como: (i) movimentos ininterruptos, com velocidades elevadas em períodos chuvosos, todavia, deveras cerceados em função da atuação solitária da gravidade; (ii) movimentos pulsativos, determinados pelas fases de variações estacionais de umidade do solo e de temperatura ou, ainda, devido à abundância de percolação em grandes precipitações e; (iii) movimentos súbitos, constituídos pelas tensões hidrostáticas nas fissuras dos materiais pelo decréscimo da resistência do solo pelo saturamento e por decorrências externas (ex.: queda de árvores).

Escorregamentos (*slides*) caracterizam-se por deslocamentos acelerados, com durabilidade moderadamente sucinta, de massas comumente bem determinadas em relação ao seu volume, cujo centro de gravidade desprende-se para baixo e para fora da encosta (AUGUSTO FILHO, 1992). A celeridade de um escorregamento aumenta de zero a aproximadamente 0,30 m por hora, cedendo, em seguida, até estabilizar-se (TERZAGHI, 1967). São capazes de alcançar velocidades mais elevadas (alguns metros por segundo), cuja velocidade total do movimento advém da inclinação da superfície do escorregamento, da razão inicial do deslocamento e da forma da encosta. Cada tipo de escorregamento é definido de acordo com seu formato e tamanho, assim como, pela qualidade do material que foi movido (TERZAGHI, 1967; AUGUSTO FILHO, 1992; SELBY, 1993; ALMEIDA FILHO *et al.*, 1999, FERNANDES & AMARAL, 1996).

Conforme Augusto Filho (1992), os escorregamentos são divididos segundo a forma do plano de ruptura (rotacional ou translacional), bem como, no tipo de elemento em movimento (ex. solo, rocha, tálus, colúvio e detritos). Os escorregamentos rotacionais (*slumps*) compreendem uma superfície de ruptura curva, na qual o material passa por uma movimentação côncava para cima. Associam-se a ambientes com presença de solos profundos, que propiciam a maior infiltração e a percolação excessiva da água (AUGUSTO FILHO, 1992).

Os escorregamentos translacionais (*shallow*), muito frequentes no Brasil (Figura 1), possuem superfícies com a forma planar, condicionadas pela existência de estruturas geológicas (ex.: fraturas), contatos entre solo e rocha e entre horizontes do solo e depósitos coluvionares de encostas, mais incoesos. Deflagram-se em encostas mais declivosas compostas por solos rasos, cujos planos de ruptura variam entre 0,5 m e 5,0 m de profundidade (AUGUSTO FILHO, 1992; SELBY, 1993; FERNANDES & AMARAL, 1996). Infanti & Fornasari (1998) relatam ainda que escorregamentos translacionais também podem ocorrer em maciços rochosos, condicionados pela xistosidade, pelo fraturamento, entre outros.

Carvalho *et al.* (2007) indicam um terceiro tipo de escorregamento (em cunha), relacionado a saprolitos e a maciços rochosos, cuja presença de dois planos de fraqueza provoca a locomoção ao longo do eixo de intersecção desses planos. São processos mais habituais em taludes antrópicos (corte/aterro) ou mesmo em encostas que passaram por

determinado processo natural de desconfinamento (ex. erosões ou escorregamentos pretéritos) (CARVALHO *et al.*, 2007).

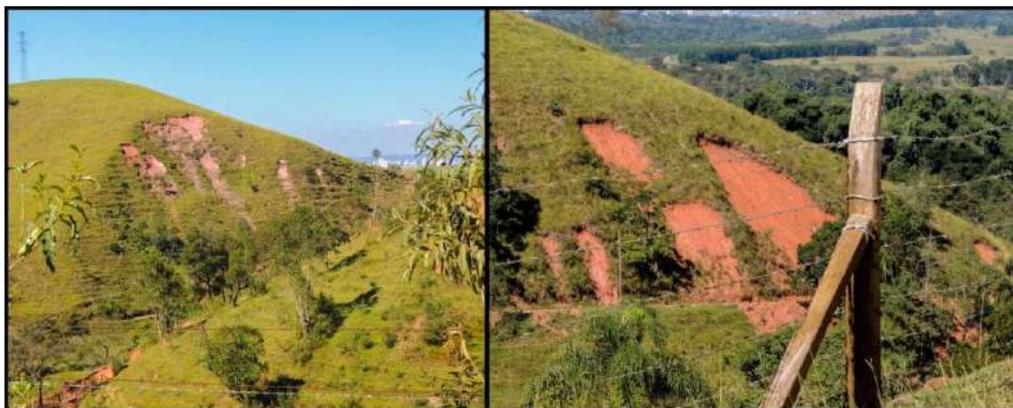


Figura 1. Exemplos de cicatrizes de escorregamentos translacionais rasos na Bacia do Rio Jaguari, afluente do Rio Paraíba do Sul, São José dos Campos (SP), deflagrados na estação chuvosa de 2020/2021. Fotos: Tullius Dias Nery (maio/2021).

As quedas de blocos (*falls*) são deslocamentos gravitacionais de blocos rochosos favorecidos pela presença de descontinuidades (ex. bandeamentos) e pela dilatação e contração provocada pela oscilação da temperatura. Essas descontinuidades contribuem para o surgimento de caminhos preferenciais para a água, favorecendo a ruptura da encosta (AUGUSTO FILHO, 1992). Maciel Filho (1997) destaca que as quedas de blocos “são definidas por uma ação de queda livre, a partir de uma elevação, com ausência de superfície de movimentação”.

Wolle & Carvalho (1989) descrevem que o mecanismo de instabilidade desses blocos não está ligado ao agente água, mas nas variações térmicas (contrações e dilatações), produzindo fissuras nos mesmos. Augusto Filho (1992) destaca que os deslocamentos desses materiais ocorrem em velocidades muito altas (vários m/s) cuja geometria varia entre placas, lascas e blocos. Fernandes & Amaral (1996) apontam que os materiais provenientes das quedas de paredões rochosos (áreas-fonte) favorecem categoricamente o desenvolvimento e a formação dos depósitos de tálus.

As corridas de detritos (*flows*) são fenômenos extremamente velozes, cujos materiais mobilizados conduzem-se como fluidos elevadamente viscosos, apresentando-se como processos de caráter essencialmente hidrológicos (Figura 2) (GUIDICINI & NIEBLE, 1984). Desenvolvem-se, geralmente, nos canais fluviais de ordens inferiores, podendo atingir o canal principal (IPT, 1991; GRAMANI, 2001; BENDA *et al.*, 2003).

A deflagração de corridas pode decorrer por meio de inundações bruscas e repentinas, causando a remobilização do material depositado no canal e em sua margem (RICKENMANN & ZIMMERMANN, 1993; GLADE, 2005; GODT & COE, 2007). Contudo, outro mecanismo de deflagração decorre da transformação rápida de escorregamentos em uma massa saturada condicionada por precipitações acumuladas que alcançam rapidamente a drenagem (CAMPBELL, 1975; IPT, 1991; KANJI *et al.*, 2008).

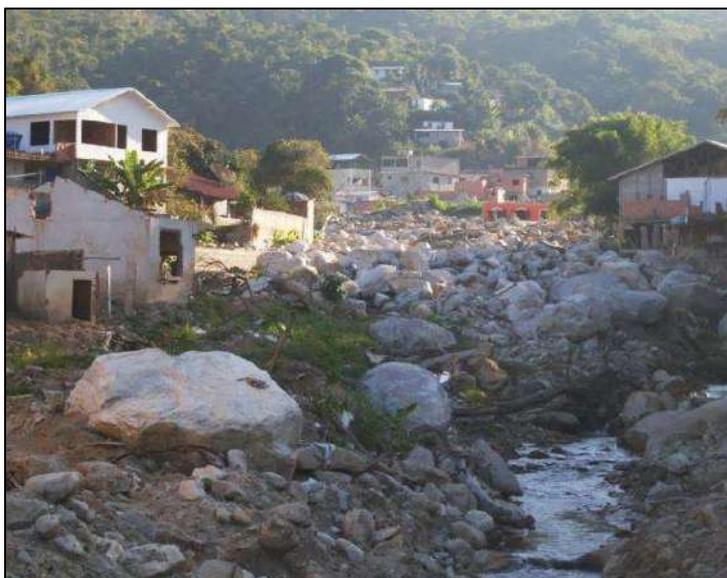


Figura 2. Exemplo de Corrida de Detrito ocorrida no Córrego dos Príncipes, Bairro da Posse, Teresópolis (RJ) em 2011. Foto: Tullius Dias Nery (maio/2011).

O desenvolvimento de corridas pode ocorrer, também, por queda de blocos, não tendo sua origem associada somente aos escorregamentos (RICKENMANN & ZIMMERMANN, 1993; GLADE, 2005; AVELAR *et al.*, 2006; BUDETTA, 2010). Segundo Avelar *et al.* (2006) e Budetta (2010), o impacto de um bloco sobre uma massa saturada ou parcialmente saturada pode levar à liquefação instantânea, transformando-se em um material viscoso. As corridas podem ser compostas por materiais sólidos de tamanhos variados (rocha, detritos grossos, grãos finos de solo ou argila) e material orgânico, apresentando elevado poder de dimensão, mesmo em áreas mais aplainadas. Tendem a tornar-se mais destrutivas quando o volume de material aumenta com a distância percorrida, devido, por exemplo, à declividade da encosta e às características da rede de drenagem (IPT, 1991; FANNIN & ROLLERSON, 1993).

Considerando-se a deflagração do processo dentro do canal, a carga de material sólido é proveniente de material erodido ou da remobilização de material depositado ao longo da drenagem, devido, por exemplo, ao barramento natural (*knickpoints*) ou pelo cessar do deslocamento de eventos pretéritos. A acumulação deste material sob condições de precipitações intensas (mm/h) pode causar o encharcamento e a inundação ao longo do canal e, conseqüentemente, deflagrar uma nova corrida (IPT, 1991; GRAMANI, 2001; KANJI *et al.*, 2008, KOBİYAMA *et al.*, 2011).

IPT (1991) e Van Steijn (1996) afirmam que o reconhecimento das corridas ocorre pela estruturação do material depositado (sedimentação de materiais localizados nas laterais ao longo do canal principal ou par de diques) (Figura 3). Segundo Van Steijn (1996), tais processos podem ser identificados no campo e/ou a partir da interpretação de imagens de satélite e fotografias aéreas. A acumulação dos materiais resultantes de corridas provém da localização de ocorrência, da morfologia do canal, do tipo de

sedimento, assim como, da presença de bloqueios (barreiras) naturais ou antrópicos, cuja imbricação e a inversão granulométrica são evidências típicas de depósitos de corridas.



Figura 3. Perfil de cascalheira coluvial exumada pela passagem de corrida de detrito deflagrada no afluente do Córrego Cuiabá, Petrópolis (RJ) em 2011. Foto: Tulus Dias Nery (maio/2011).

3. INVENTÁRIOS E ESCALAS DE ANÁLISE

A identificação de movimentos de massa ocorre no tempo e no espaço, por meio de trabalhos de campo, arquivos históricos (ex.: jornais e artigos), interpretação de fotografias aéreas ou imagens de satélite, tendo como resultante um mapa de inventário ou um banco de dados. Os inventários representam a localização espacial dos processos e podem ser considerados dados de entrada para diferentes métodos preditivos, pois fornecem o tipo, a distribuição e a frequência de ocorrência, os mecanismos de falha, os fatores causais, os volumes e os danos causados (ALEOTTI & CHOWDHURY, 1999; PARISE, 2001; VAN WESTEN *et al.*, 2008).

No entanto, os mapas de inventários apresentam alguns questionamentos quanto à escala de análise adotada, que pode variar entre local e nacional (MANTOVANI *et al.*, 1996; FELL *et al.*, 2008; GALLI *et al.*, 2008; GUZZETTI *et al.*, 2012). Nesse sentido, a escolha da escala incide sobre a experiência dos envolvidos na pesquisa, no tempo da investigação, no tipo de problema (qual processo será mapeado?), nos dados, nos recursos financeiros disponíveis e nas técnicas empregadas (Tabela 1) (VAN WESTEN *et al.*, 2008).

Inventários com base em arquivos, de forma geral, são encontrados em escala regional ou nacional e buscam alimentar bancos de dados com informações obtidas por meio de arquivos jornalísticos, publicações científicas, relatórios técnicos e decretos de Defesas Civis Municipais. Estes podem ser complementados por fotointerpretação e por investigação de campo, de acordo com os tipos de movimento, magnitudes e impactos à sociedade (TRIGILIA *et al.*, 2010; CEPED, 2012; BERNARDES *et al.*, 2019).

Tabela 1. Compilado de técnicas para obtenção de informação para o inventário de processos.

Grupo	Técnica*	Escala			
		Regional	Média	Grande	Detalhe
Interpretação de imagem de satélite e fotografia aérea.	Fotografias aéreas.	M	A	A	A
	Imageamento por satélite de alta resolução.	M	A	A	A
	Mapas sombreados de relevo – LiDAR.	B	M	A	A
	Imagens de radar.	B	M	M	M
Classificação (semi) automatizada sobre características espectrais.	Fotografias aéreas.	M	A	A	A
	Resolução média de imagens espectrais (par de imagem).	A	A	A	M
	Resolução média de imagens espectrais (pares de imagens).	A	A	A	M
	Uso combinado de dados ópticos e de radar.	M	M	M	M
Classificação (semi) automatizada baseada sobre as características de altitude.	InSAR (Interferometria de radar).	M	M	M	M
	InSAR (Dispensores permanentes para dados de deslocamento).	A	A	A	A
	LiDAR (Sobreposição de DEMs do tipo LiDAR de diferentes períodos).	B	B	M	A
	Fotogrametria (Sobreposição de DEMs para diferentes períodos).	B	M	A	A
Métodos de investigação de campo.	Mapeamento em campo (Método convencional).	M	A	A	A
	Mapeamento em campo (GIS móvel e GPS).	B	A	A	A
Arquivos (relatórios técnicos, boletim de ocorrências, artigos).	Entrevistas (questionários, <i>workshops</i> , entre outros).	B	M	A	A
	Arquivos de jornais (estudos históricos, livros e outros arquivos).	A	A	A	A
	Empresas de manutenção de vias (terrestres, ferroviárias).	B	M	A	A
	Polícia e Corpo de Bombeiros (registros de ocorrências).	B	M	A	A
Métodos de datação (para movimentos de massa).	Direto (Dendrocronologia, datação por radiocarbono, etc.).	B	B	B	M
	Indireto (Análise de pólen e liquenometria).	B	B	B	B
Sistemas ou redes de monitoramento.	Extensômetros (informação contínua da velocidade do movimento).	-	-	B	A
	EDM (Rede de Medições Eletrônicas de Distância).	-	-	B	A
	GPS.	-	-	B	A
	Estação Total (rede de medição por teodolito).	-	-	B	A
	InSAR (radar terrestre com trilho deslizante).	-	-	B	A
	LiDAR (escaneamento terrestre a laser).	-	-	B	A

*Indica a aplicabilidade de cada técnica em função da escala adotada (B= Baixa, M= Média, A= Alta). Base de dados: Van Westen *et al.*, (2008).

O modo mais comum para a construção de inventários é a interpretação de imagens de satélite e fotografias aéreas. O reconhecimento dos processos nas imagens pode ser evidenciado pela perda de cobertura vegetal, superfície de ruptura, grau de atividade, declividade, forma (côncava, retilínea ou convexa), largura, extensão, profundidade e orientação (DOMINGUES, 2001; BARLOW *et al.*, 2003; LOPES & ARRUDA JUNIOR, 2015) (Figura 4). A principal vantagem consiste na facilidade de identificação dos processos em imagens, sobretudo, quando obtidas logo após o evento. As desvantagens caracterizam-se pelo tempo consumido, a depender da escala de análise, pela dificuldade de classificar e de identificar os mecanismos de ruptura e pelos recursos disponíveis, quando da necessidade de investigações de campo (BARLOW *et al.*, 2003; LU *et al.*, 2004; LEE & LEE, 2006; GUZZETTI *et al.*, 2012).

A elaboração de inventários pode ser realizada com a ajuda da classificação semiautomática de fotografias aéreas ou imagens de satélite e as escalas de análise podem variar entre a média e a de detalhe. A identificação de movimentos de massa no âmbito do sensoriamento remoto passa pelo reconhecimento e pela classificação dos processos quanto ao tamanho (objeto), contraste (diferenças espectrais entre a área deslizada e as áreas circunvizinhas), resolução espacial e características morfológicas (tipos de movimentos) (MANTOVANI *et al.*, 1996; SESTINI & FLORENZANO, 2004).

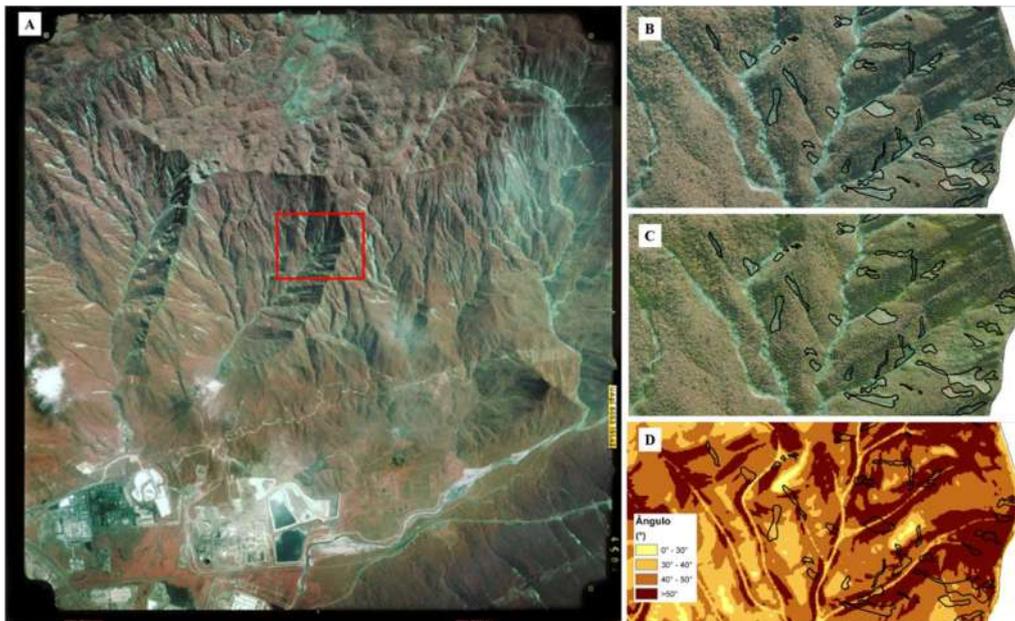


Figura 4. (A) Fotografia aérea de 1985 da bacia da Ultrafértil, Serra do Mar, Cubatão/SP, em escala 1:25.000. O mapeamento das cicatrizes considerou a tonalidade branco-esverdeada (B), com apoio das curvas de nível (C) e do ângulo da encosta (D). Os processos ocorreram de forma generalizada, concentrados, principalmente, em encostas convexas e retilíneas. Fonte da fotografia aérea: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. Mapas: autores.

Na classificação semiautomática, existem inúmeras técnicas para a extração de movimentos de massa, destacando-se a técnica baseada em *pixel* e a baseada no objeto (forma, textura, etc.) (LU *et al.*, 2004; BLASCHKE, 2010; MOOSAVI *et al.*, 2014; LI *et al.*, 2016). A técnica baseada em *pixel* envolve a aquisição dos valores do *pixel* em diferentes imagens (ou bandas) e à sua diferença, ou seja, a subtração dos valores dos *pixels* entre duas imagens resulta em um terceiro conjunto de *pixels*. A partir da diferença na imagem, caso a porcentagem do Número Digital (*Digital Number*) seja igual a zero, não ocorreu nenhuma mudança na área. Contudo, se ocorrer alteração no brilho destas áreas, valores positivos e negativos serão atribuídos. Ressalta-se que a classificação de cada *pixel* na imagem não considera a sua vizinhança. A desvantagem, portanto, encontra-se na definição dos valores de entrada (limiares) de mudança ou não mudança nas imagens resultantes (HERVÁS *et al.*, 2003; CHENG *et al.*, 2004; LEE & LEE, 2006; MOOSAVI *et al.*, 2014; MISHRA *et al.*, 2017; SUN *et al.*, 2017).

A técnica de classificação orientada por objetos (OBIA) fundamenta-se no conceito de segmentação e de classificação da imagem. A OBIA é baseada em objetos provenientes do fracionamento da imagem em seções homogêneas, reduzindo o nível de detalhe e de complexidade na imagem, resultando em polígonos (objetos) caracterizados por técnicas estatísticas (média ou valores de variação em todas as bandas), forma (comprimento, largura e área), textura e características contextuais (relações mútuas dos objetos na imagem) (BENZ *et al.*, 2004; COHENCA & CARVALHO, 2015).

De acordo com Hölbling *et al.*, (2017), quando empregado na identificação de um escorregamento, o reconhecimento será composto por agregações de *pixels* homogêneos,

em vez de um único *pixel* (sem correlação espacial e classificado conforme suas características). A partir da técnica de segmentação e dos parâmetros de segmentação, cria-se um objeto e, posteriormente, a sua classificação (semelhança entre os *pixels* pertencentes a uma determinada classe), identificando-se o escorregamento (objeto) (MOOSAVI *et al.*, 2014; HÖLBLING *et al.*, 2017). A desvantagem consiste na dependência do analista, demandando tempo para determinar os parâmetros de definição das classes (COHENCA & CARVALHO, 2015; HÖLBLING *et al.*, 2017).

Os inventários em escala de detalhe visam monitorar o comportamento de um escorregamento, envolvendo estudos geodésicos, geofísicos e geotécnicos. Os instrumentos utilizados monitoram o deslocamento da massa (inclinômetro e estação total), a precipitação (estações pluviométricas), o nível de água do lençol freático (piezômetro), a análise química do solo e as técnicas de ruído (vibrações) (*Ambient Noise Interferometry-ANI*) para examinar os efeitos da chuvas e da carga mecânica sobre a encosta (HERVÁS, *et al.*, 2003; CRAWFORD *et al.*, 2015; MENDES *et al.*, 2017; ARTESE & PERRELLI, 2018; BORTOLOZO *et al.*, 2019; HUSSAIN *et al.*, 2019; CERRI *et al.*, 2020).

4. ENSAIOS DE CAMPO E DE LABORATÓRIO

Ensaio de campo e de laboratório empregados como técnicas de previsão visam examinar e compreender os diferentes atributos dos invólucros pedológicos, as características do movimento, a velocidade e a geometria, o padrão e a fração de fluxo de água (CROZIER, 1986; CRUDEN *et al.*, 1986; AUGUSTO FILHO, 1992; SELBY, 1993; FERNANDES & AMARAL, 1996; SHOAEI & SIDLE, 2009).

No tocante aos escorregamentos, uma de suas causas internas é a modificação do equilíbrio entre as tensões no interior da massa. Quando a água diminui o valor da coesão, diminuirá a resistência às tensões de cisalhamento, deflagrando o processo (DE PLOEY & CRUZ 1979; GREENWAY, 1987; FIORI, 1995; COLLINS & ZNIDARCIC, 2004; LACERDA, 2007). Outro mecanismo de instabilização deriva-se pela redução da coesão aparente e da sucção, relacionada à elevação de umidade do solo em função do crescimento da frente de infiltração, cuja ruptura transcorre sem que o estado de saturação seja atingido (DAVINO, 1970; RIGHES *et al.*, 1983; FREDLUND, 1987; WOLLE e CARVALHO, 1989; KIM *et al.*, 2004; TIWARI *et al.*, 2004).

As propriedades físicas, mecânicas e hidrológicas, ao serem avaliadas em campo e em laboratório, são mensuradas em diferentes profundidades. Permitem avaliar a influência de cada característica (ex.: coesão) frente aos fluxos de água, principalmente, durante períodos chuvosos (DE PLOEY & CRUZ, 1979; RIGHES *et al.*, 1983; WOLLE & CARVALHO, 1989; KIM *et al.*, 2004; COLLINS & ZNIDARCIC, 2004; AMARAL JUNIOR, 2007; MENDES, 2008; SHOAEI & SIDLE, 2009; PERDOMO, 2010; FERREIRA, 2013; VIEIRA *et al.*, 2015; GOMES & VIEIRA, 2016).

Cicatrizes de escorregamentos podem ser utilizadas como referências de coleta de amostras deformadas¹ e indeformadas² para diferentes ensaios (Tabela 2). Conforme observado nos trabalhos de Mendes (2008) e de Ferreira (2013), cada cicatriz pode ser selecionada a partir dos seguintes padrões: (i) tamanho e relevante volume de material movimentado; (ii) presença de limites conservados; (ii) possibilidade de alcance em campo; (iv) cicatrizes sem nenhuma ligação com práticas antropogênicas, entre outros.

Tabela 2. Referências para coleta de amostras deformadas e indeformadas (ensaios de laboratório).

ENSAIO	MÉTODO	AMOSTRA DEFORMADA	AMOSTRA INDEFORMADA
Granulometria	ABNT (NBR: 7181/84)	X	
Limites de Atterberg	ABNT (NBR: 6459/84) e ABNT (NBR: 7180/84)	X	
Porosidade	Mesa de tensão (KIEHL, 1979)		X
Densidade de partículas	Balão volumétrico (KIEHL, 1979)	X	
Ensaio de Cisalhamento Direto	ASTM D3080-04		X

Fonte: Organizado pelos autores.

Nas cicatrizes, as amostras deformadas e indeformadas são retiradas ao longo de distintas profundidades, conforme forem apreciadas modificações tátil-visuais (texturais) dos grãos de solo, no esforço de distinguir melhor as variações por toda a extensão dos perfis (Figura 5). Sugere-se que as coletas ocorram em pelo menos três pontos das cicatrizes selecionadas (superior, lateral e centro), permitindo formar um único perfil e buscando concernir a dinâmica do material removido e o material que perdurou após o escorregamento (retroanálise). As seguintes propriedades podem ser investigadas nestas coletas: distribuição granulométrica, limites de Atterberg³, porosidade, densidade dos grãos, curvas de retenção de água e resistência ao cisalhamento (MENDES, 2008; FERREIRA, 2013).

A resistência ao cisalhamento é definida pela máxima tensão cisalhante que o solo pode suportar sem romper-se, ou ainda, a tensão de cisalhamento que acontece no plano de ruptura no momento do deslizamento, derivado, sobretudo, pela coesão e pelo atrito, desencadeado pela elevação do lençol freático (influxo de água) (HUTCHINSON, 1988; SENDIR & YILMAZ, 2002; PINTO, 2006; TOFANI *et al.*, 2017). Para a realização desse ensaio, amostras indeformadas devem ser coletadas na forma de blocos (ABNT/NBR-9604/2016) com dimensões de 30 cm x 30 cm x 30 cm *in situ*. Posteriormente, são levadas ao laboratório para realização dos ensaios de resistência por cisalhamento direto inundado

¹A amostra deformada de solo é adquirida com considerável alteração de seus atributos *in situ*. É também denominada de amostra amolgada, quando acontece a desfragmentação do material coletado (KIEHL, 1979).

²Amostras indeformadas de solos caracterizam-se pela coleta com o menor grau de deformação plausível, conservando suas estruturas, estado de umidade, consistência e aglomerados naturais (KIEHL, 1979).

³Os Limites de Atterberg determinam-se por meio da quantidade de umidade consonante às alterações de estado do solo, atribuídos como: Limite de Liquidez (LL) e Limite de Plasticidade (LP) dos solos. As distinções entre esses dois limites representam o limiar de valores cujos solos expressam-se como plástico, determinado como Índice de Plasticidade (IP) do solo. O LP só é utilizado para a determinação do IP segundo a ABNT (NBR: 6459/84) e (NBR: 7180/84).

(ASTM/D3080-04/2004), onde também são talhados corpos de prova em anéis cilíndricos biselados de PVC ou metal rígido com 5,0 cm de altura e 5,0 cm de diâmetro interno para a determinação das curvas de retenção de água e obtenção da Porosidade total, Macro e Microporosidade, conforme a Figura 6 (KIEHL,1979).



Figura 5. Demarcação para coleta de amostras deformadas e indeformadas ao longo de distintas profundidades, conforme são observadas alterações texturais (tátil-visuais) dos grãos de solo, buscando-se melhor descrever as alterações do perfil. Foto: Fabiana Souza Ferreira (maio, 2012 - Município de Caraguatatuba/SP).



Figura 6. Coleta de bloco indeformado in situ e acondicionamento (A e B); Corte do bloco em laboratório para o ensaio de cisalhamento direto inundado e corpos de prova talhados em anéis cilíndricos de metal rígido com 5,0 cm de altura e 5,0 cm de diâmetro interno (C); Corpo talhado de amostra indeformada e amostra devidamente acondicionada em célula de metal para ensaio de cisalhamento direto inundado (D). Fotos: Fabiana Souza Ferreira (Maio, 2012 - Município de Caraguatatuba/SP).

Uma das modificações essenciais do solo refere-se à sua estrutura, dado que o seu equilíbrio é sujeito ao seu regime de agregação. Ao se discutir a textura dos solos, por exemplo, a suscetibilidade a movimentos de massa irá se correlacionar com a destacabilidade e a transportabilidade das partículas associadas, respectivamente, às forças da natureza e aos seus atributos físicos, como tamanho e forma. Tal dinâmica pode determinar o comportamento dos fluxos da água, a cimentação destes solos e a sua resistência (SCHJONNING, 1991; WANG *et al.*, 2003). Uma vez que o comportamento da água pode reduzir o valor da coesão, conseqüentemente, ocorrerá a diminuição da resistência às tensões de cisalhamento, culminando na movimentação de massas de solo (DE PLOEY & CRUZ 1979; WOLLE & CARVALHO, 1989; LACERDA, 2007; AMARAL JUNIOR, 2007).

Muitas pesquisas já envolveram a instrumentação *in situ* com ensaios de laboratório (Tabela 3), cujo material envolvido nos escorregamentos foi, essencialmente, o contato entre pacotes pedológicos mais superficiais e camadas coluvionares, além da cobertura vegetal, serrapilheira e solo orgânico superficial (WOLLE & CARVALHO, 1989; AMARAL JUNIOR, 2007; MENDES, 2008; PERDOMO, 2010; FERREIRA, 2013). Os pacotes de solos apresentaram, normalmente, espessuras em torno de 1 m e 2 m, com sua metade superior mais densamente penetrada pelas raízes da vegetação, assentada sobre uma camada saprolítica, com reminiscência da estrutura da rocha de origem.

Wolle & Carvalho (1989), por exemplo, encontraram solos areno-argilosos e arenosos, cujas camadas superficiais apresentaram ângulo de atrito menor (34°) em detrimento da camada acima (39°) e valores de coesão entre 1 kPa e 4 kPa (Tabela 3). Os valores de coesão elevaram-se em função do aumento de tensão exercida pela água presente no solo, até que essa alcançasse faixas entre 1 kPa e 4 kPa.

Amaral Junior (2007) verificou que as envoltórias de resistência ao cisalhamento saturado exibiram uma inclinação constante por toda a faixa de tensões normais. O autor obteve valores menores de coesão e de ângulo de atrito, respectivamente, 1 kPa e 9 kPa e 42° e 32°, para os horizontes superficiais areno-siltosos e areno-argilosos (Tabela 3). A agregação destes solos nos horizontes mais superficiais, contendo 70% de areia e 10% de argila, não apresentou resistência suficiente para induzir alterações consideráveis na inclinação e no intercepto da envoltória. Dessa forma, pôde-se confirmar que mesmo as tensões normais baixas empregadas (14 kPa) foram capazes de romper os agregados deste solo, de modo que a envoltória foi determinada por suas características granulométricas, tal como, os valores alcançados por Ferreira (2013), designados por 80% de areia e 10% de argila (Tabela 3).

Mendes (2008), Perdomo (2010) e Ferreira (2013) salientam que, para solos instrumentados na Serra do Mar (Tabela 3), os teores de argila foram escassos para gerar uma coesão relevante entre as partículas de areia quando o solo encontrava-se seco. Deste modo, a coesão avaliada era quase tão somente em função de meniscos de água nas áreas de contato.

Tabela 3. Parâmetros geotécnicos de diferentes áreas instrumentadas na Serra do Mar.

Local/Autores/Ano	Ângulo da encosta (°)	Litologia	Solo	Textura	Espessura (m)	Coesão (kPa)	Ângulo de atrito (°)
Cubatão (SP) / Wolle e Carvalho (1989)	40	Migmatitos	Superficial	Areno-argiloso	1,0	1,0	34
			Saprolítico	Arenosa ou siltosa	1,0 a 2,0	4,0	39
	43		Superficial	Argilo-arenoso	1,0	1,0	36
			Saprolítico	Arenosa ou siltosa	1,0 a 2,0	3,5	39
Costa Verde (RJ) / Amaral Junior (2007)	SI*	Biotita Gnaiss	Residual Maduro	Areno-siltosa	0,1 a 2,0	8,0	32
			Residual Jovem	Areno-siltosa	0,2 a 8,0	4,5	42
			Saprolítico	Areno-siltosa	0,1 a 2,0	10,0	32
		Migmatitos	Residual Maduro	Areno-siltosa	0,8 a 7,0	5,5	39
			Residual Jovem	Areno-silto-argilosa	0,5 a 3,0	1,0	42
			Saprolítico	Areno-siltoso	0,8 a 3,0	9,0	32
Ubatuba (SP) / Mendes (2008)	~10	Migmatitos	Saprolítico	Areno-siltoso	14,0	13,0	31,4
			Residual	Areno-silto-argilosa	1,0	9,5	32,9
	~15	Charnockitos	Residual	Areno-argilo-siltosa	1,0	10,0	31,6
			Saprolítico	Areno-silto-argilosa	7,0 a 8,0	7,0	40,4
Ubatuba (SP) / Perdomo (2010)	22	Gnaisses	Residual	Franco argiloso/arenoso	0,43 a 0,50	12,1	32,3
			Residual Maduro	Franco argiloso	0,87 a 0,92	7,4	36,2
			Residual Maduro	Franco argiloso	1,53 a 1,61	13,9	33
	33		Residual	Argilosa	0,26 a 0,72	17,7	27,6
			Residual Maduro	Argilosa	1,18 a 1,8	19,1	28,5
Caraguatatuba (SP) / Ferreira (2013)	~32-36	Gnaisses e Metassedimentos	Superficial	Franca	0,4	0	29,1
			Saprolítico	Franco arenosa	1,75	1,2	31,9
			Residual	Franco argiloso	0,6	2,16	25,8
			Residual Maduro	Franco arenosa	2,0	11,06	36,8
			Superficial	Franco siltosa	0,45	0	36,7
			Residual Maduro	Franco argiloso	2,0	0	33,5

*Sem informação. Fonte: Organizado pelos autores.

5. MODELOS DE PREVISÃO

5.1 Método Heurístico: o modelo AHP

O modelo AHP (*Analytic Hierarchy Process*) constitui-se em uma técnica heurística de avaliação multicritério (combinação de mapas temáticos por meio de matrizes). Surgiu na década de 1970, desenvolvido pelo matemático estadunidense Thomas Saaty. A priori, o AHP foi elaborado para ajudar na resolução de problemas que envolviam a área da Administração. Posteriormente, passou a ser aplicado nos mais diversos campos, inclusive na Geomorfologia (SAATY, 1991; RAFFO, 2012; BISPO *et al.*, 2020).

Conforme Raffo (2012), o AHP é um modelo matemático utilizado para mensurar parâmetros via influência do pesquisador com o mesmo, ao inserir considerações quantitativas (pesos). O modelo vem sendo amplamente utilizado para previsão de escorregamentos, internacionalmente e nacionalmente, apresentando resultados com excelente precisão (Figura 7 e Tabela 4).

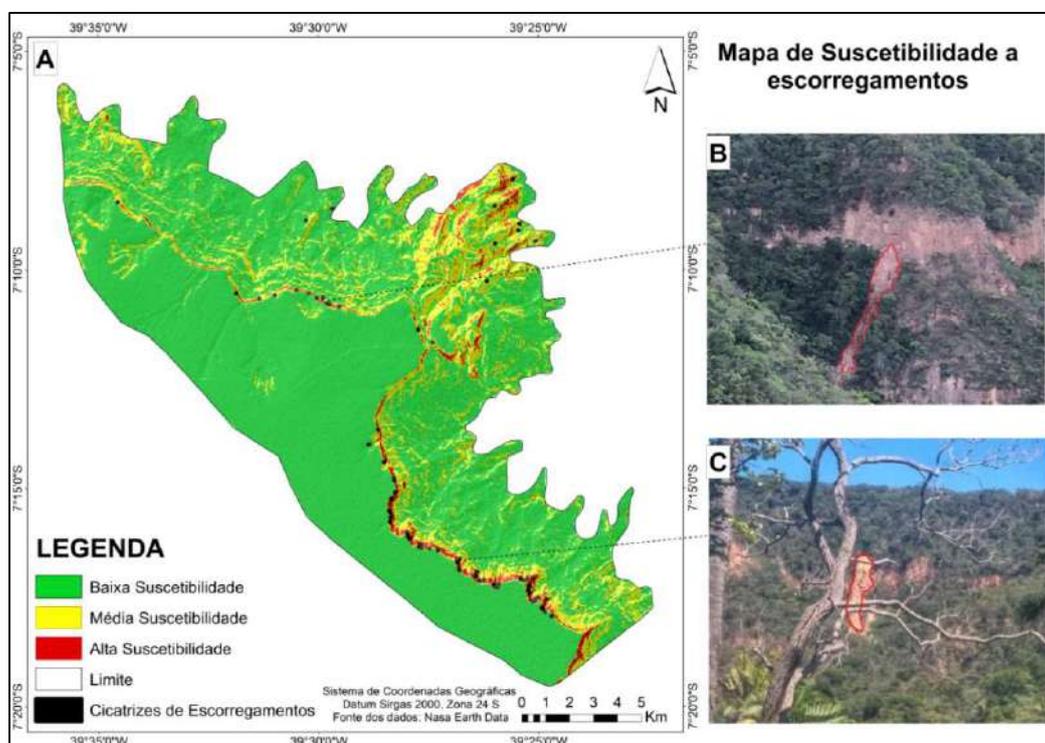


Figura 7. (A) Exemplo de mapa de suscetibilidade a escorregamentos gerado pelo modelo AHP em uma região da Chapada do Araripe (CE); (B e C) Cicatrizes de escorregamentos translacionais previstas pelo modelo em classes de alta suscetibilidade, indicando o sucesso da previsão realizada. Fonte: Mapa (Autores), Foto B (Fabrizio de Luiz Rosito Listo, novembro/2020), Foto C (Carlos de Oliveira Bispo, novembro/2020).

Em seu processo de análise, existe uma base matemática, na qual é possível estruturar e analisar a relevância correspondente entre cada um dos critérios adotados e averiguar a coerência dos julgamentos realizados pelas matrizes. Envolve a hierarquização do problema com a atribuição de pesos que definem a contribuição relativa de cada variável. A hierarquia é definida pelo especialista por meio da comparação pareada das variáveis, na qual é delegado um parâmetro de intensidade de relevância entre os mesmos (SAATY, 1991).

Os pesos são atribuídos considerando sua importância relativa, de acordo com a escala denominada *Escala Fundamental de Saaty*. Esta varia da intensidade com importância 1 (igual importância, ou seja, dois parâmetros contribuem igualmente com o objetivo) à intensidade 9 (extremamente importante), quando há predominância de um parâmetro sobre o outro. Depois da comparação pareada, calcula-se o valor de consistência, buscando a confirmação do julgamento, a partir do índice Razão de Consistência (RC). Tal índice analisa a inconsistência em decorrência da ordem da matriz

de julgamentos (Equação 1). Por fim, o Índice de Consistência (IC) verifica o nível de inconsistência decorrente da matriz de julgamentos paritários (Equação 2).

$$RC = IC/IR \quad (\text{Equação 1})$$

Onde: “RC” é a Razão de Consistência; “IC” é o Índice de Consistência; e “IR” é o Índice Randômico.

$$IC = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1), \text{ onde } \lambda_{\max} = 1/n \sum_{i=1}^n [Aw] / w_i \quad (\text{Equação 2})$$

Onde: “n” é o número de ordem da matriz; “ λ_{\max} ” é o autovetor; “ w_i ” são os pesos calculados; e “Aw” é o produto entre “ w_i ” com a matriz de correlação pareada.

Tabela 4. Exemplos de trabalhos que utilizaram o modelo AHP para previsão de escorregamentos e índices de acerto.

Autor e ano	Área de estudo	Parâmetros utilizados	Índice de acerto
Reis <i>et al.</i> (2012)	Nordeste da Turquia.	Declividade, litologia, orientação, densidade da drenagem, distância de estradas e uso da terra.	73%
Vanacôr & Rolim (2012)	Rio Grande do Sul, Brasil.	Declividade, curvatura, hipsometria, orientação, distância de drenagem, solo, uso da terra, distância das vias.	60,61%
Kayastha <i>et al.</i> (2013)	Tinau, oeste do Nepal.	Declividade, aspecto, curvatura, hipsometria, geologia, drenagem, pluviometria, falhas e uso da terra.	77,5%
Shahabi <i>et al.</i> (2014)	Azerbaijão Ocidental, Irã.	Declividade, aspecto, litologia, precipitação, drenagem, solo, distância das estradas e falhas.	81,15 %
Kumar <i>et al.</i> (2015)	Nilgiri, Índia.	Declividade, hipsometria, aspecto, curvatura, geologia, uso da terra, distância da drenagem, Índices de Potência de Fluxo e de Umidade, NDVI, precipitação, lineamentos e proximidade da estrada.	83%
Pradhan & Kim (2016)	Nordeste da Coréia do Sul.	Declividade, aspecto, curvatura, hipsometria, drenagem, solo, geologia e vegetação.	86,67%
Silva Junior <i>et al.</i> (2016)	São Luís (MA), Brasil.	Declividade, hipsometria, formas, geologia, geomorfologia, solo e uso da terra.	88%
Brito <i>et al.</i> (2017)	Porto Alegre (RS), Brasil.	Declividade, litologia, acúmulo de fluxo e distância de lineamentos.	95%
Meirelles <i>et al.</i> (2018)	Teresópolis (RJ), Brasil.	Declividade, orientação, formas, geologia, pedologia, uso da terra, solo, relevo, proximidade da drenagem e de estradas.	77%
Bispo <i>et al.</i> (2020)	Maceió (AL), Brasil.	Declividade, geologia, unidades geomorfológicas, formas da encosta, solo e uso da terra.	74%

Fonte: Organizado pelos autores.

A capacidade de tolerância (inconsistências da matriz de pareamento) intitula-se Índice Randômico, dado por uma tabela contituída de valores provenientes da proporção da matriz de comparação. O IR é alcançado por uma matriz randômica de dados recíprocos, diante de elementos não-negativos. Saaty (1991) realizou várias simulações em laboratório, visando estabelecer valores de matriz N aproximadas.

Tendo como base os índices IC e IR, obtem-se um valor de Razão de Consistência (RC), que julga o sucesso da previsão realizada. Deste modo, valores de RC mais próximos de “0” representam excelente coerência dos cálculos supracitados e o resultado final será um modelo de melhor acurácia. Todavia, valores de RC superiores a “0,10” demonstram inconsistências e, dessa forma, o pareamento dos parâmetros deverá ser realizado novamente (SAATY, 1991). Uma das grandes vantagens do AHP é a diminuição da subjetividade inerente à análise multicritério. Como desvantagem, pode-

se citar a dificuldade de parâmetros em mesma escala, sobretudo, para trabalhos de detalhe.

5.2 Modelos Matemáticos em bases físicas: SHALSTAB, SINMAP e TRIGRS

O modelo SHALSTAB (*Shallow Slope Stability Model*) foi desenvolvido por Dietrich *et al.*, (1993) e Montgomery & Dietrich (1994). Posteriormente, o mesmo foi automatizado em uma rotina denominada SHALSTAB por Dietrich & Montgomery (1998). Sua função é calcular a suscetibilidade a escorregamentos translacionais rasos, a partir da combinação entre um modelo de estabilidade, apoiado na Equação do Talude Infinito, e um modelo hidrológico do tipo *steady-state*, tendo como base, fluxos subsuperficiais constantes, fundamentados nos trabalhos realizados por Beven & Kirkby (1979) e O’Loughlin (1986).

A partir da compilação dos modelos de estabilidade e hidrológico, adicionam-se (como *inputs*) os parâmetros topográficos (área de contribuição e ângulo da encosta), obtidos a partir de um Modelo Digital do Terreno (MDT), e as propriedades mecânicas do solo (ex.: ângulo de atrito interno, coesão, profundidade do solo e peso específico) (MONTGOMERY & DIETRICH, 1994). A Equação 3 demonstra o resultado da combinação dos modelos para cada célula dentro do *grid*, resolvida pela rotina automatizada do modelo em ambiente SIG.

Devido à dificuldade de se precisar a transmissividade do solo que resulta da relação entre a condutividade hidráulica saturada e a profundidade do solo, Montgomery & Dietrich (1994) estabeleceram uma classificação utilizando os valores de Log (Q/T) (Equação 3). Tal fato permitiu a categorização do relevo, com base na suscetibilidade a escorregamentos, assinalando que, quanto mais alto for o valor absoluto da razão Q/T, do qual, Q representa a chuva em situação crítica (m/dia) e T equivale à transmissividade do solo saturado (m²/dia), mais alta será a instabilidade da área (MONTGOMERY & DIETRICH, 1994).

O mapa obtido pelo modelo apresenta sete classes de suscetibilidade, desde a mais instável (incondicionalmente instável e saturado) até a mais estável (incondicionalmente estável e saturado) (Figura 8). Tal classificação acompanha a circunstância exposta pela igualdade entre a razão hidrológica (Q/T) e a razão da área de contribuição pela unidade de contorno (a/b) (MONTGOMERY & DIETRICH, 1994).

$$\text{Log (Q/T)} = \frac{\text{sen}\theta}{\left(\frac{a}{b}\right)} \left[\frac{C'}{\rho_w g z \cos^2 \theta \tan \phi} + \frac{\rho_s}{\rho_w} \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi} \right) \right] \quad (\text{Equação 3})$$

Onde: “a” é a área de contribuição ou área drenada a montante (m²); “b” é o comprimento de contorno unitário (m); “C’” é a coesão do solo (kPa); “g” é a aceleração da gravidade (m/s²); “θ” é o ângulo da encosta (grau); “ρs” é a densidade (massa específica) do solo saturado (kg/m³); “ρw” é a densidade da água (kg/m³); “Q” é a chuva em estado crítico necessária para a ruptura (m/dia); “T” é a transmissividade do solo saturado (m²/dia); “z” é a espessura do solo (m); e “Φ” é o ângulo de atrito interno do solo (grau).

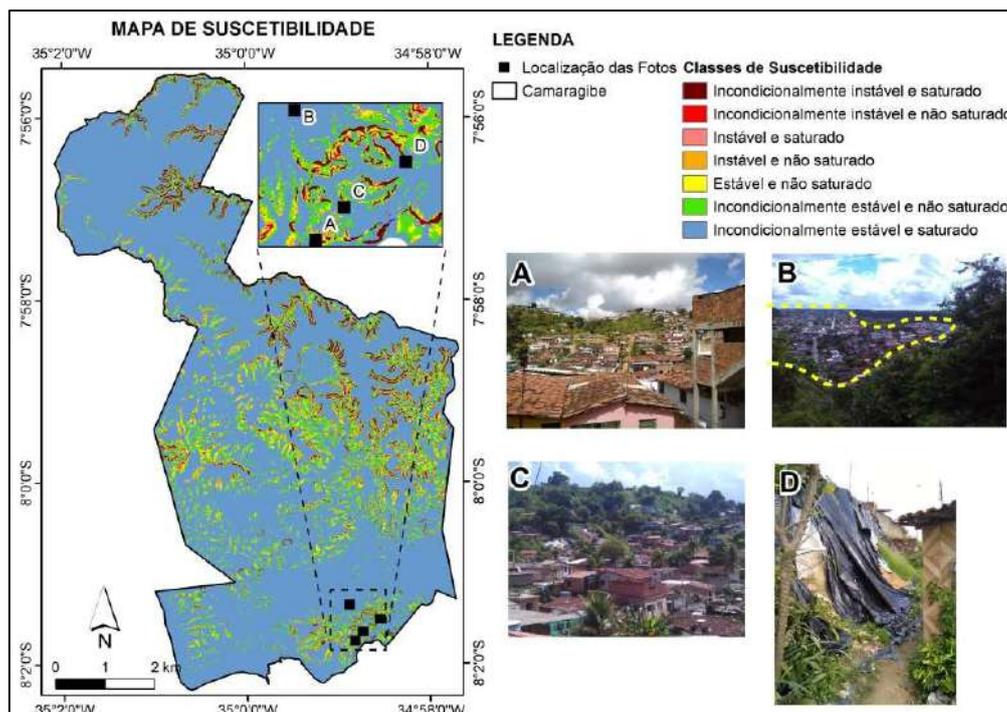


Figura 8. À esquerda, exemplo de mapa de suscetibilidade a escorregamentos rasos obtido pelo SHALSTAB no município de Camaragibe, Região Metropolitana do Recife (PE), com destaque para as áreas incondicionalmente instáveis. À direita, ocupação antrópica em encostas da Formação Barreiras (Foto A); Vista da região mais aplainada do município de Camaragibe, onde se localizam as áreas menos suscetíveis (Foto B); Encosta da Formação Barreiras classificada como de maior suscetibilidade a escorregamentos (Foto C); e Área classificada como estável, mas com escorregamentos, provavelmente deflagrados por parâmetros antropogênicos (Foto D). Fonte: Mapa (autores); Fotos: Edwilson Medeiros dos Santos (abril, 2018).

A aplicação do SHALSTAB na literatura geomorfológica brasileira apontou resultados relevantes desde a primeira década dos anos 2000, destacando-se os estudos de Guimarães *et al.* (2003), Ramos *et al.*, (2003), Fernandes *et al.*, (2004), Listo & Vieira (2012), Santos (2020), entre outros. Internacionalmente, destacam-se os trabalhos de Dietrich & Montgomery (1998), Gorsevski *et al.*, (2006), Aronica *et al.*, (2012), Teixeira *et al.*, (2014), Kim *et al.*, (2016), etc.

Dentre as limitações relacionadas ao uso do SHALSTAB, realça-se a sua utilização em áreas de solo espesso, relativamente planas, com afloramentos de rochas e paredões rochosos. Logo, sua utilização é limitada à análise da suscetibilidade a escorregamentos translacionais rasos, onde esteja bem estabelecido um plano de transição, como por exemplo, a transição solo/rocha (DIETRICH & MONTGOMERY, 1998; GUIMARÃES *et al.*, 2003; LISTO, 2011).

O modelo SINMAP (*Stability INDEX MAPping*) visa auxiliar a identificação de áreas passíveis de instabilização (PACK *et al.*, 1998), já tendo sido aplicado por Lan *et al.*, (2004); Jelínek & Wagner (2007); Lopes *et al.*, (2007); Meisina & Scarabelli (2007); Deb & El-Kady (2009); Terhorst & Kreja (2009); Ylmaz & Keskin (2009); Vestena

(2010); Dourado & Roig (2013); Pechincha & Zaidan (2013); Nery & Vieira (2015) e Simões *et al.*, (2016).

Fundamentado no modelo de estabilidade (talude infinito), o Fator de Segurança ou os Índices de Estabilidade são obtidos por meio de parâmetros geotécnicos e hidroclimatológicos, assim como, dados topográficos derivados de um MDT. Portanto, para cada célula do *grid* na área estudada, é atribuída uma classe de estabilidade ou de instabilidade. O índice de estabilidade representa a possibilidade de uma encosta ser estável, ou não, assumindo um arranjo semelhante dos parâmetros sobre os limites de incertezas do modelo (PACK *et al.*, 1998). Os índices de estabilidade dividem-se em seis classes, desde $IE > 1,5$ (Estável) a $IE < 0,0$ (Instável), obtidos a partir da Equação 4.

$$FS = \frac{C + \cos\theta \left[1 - \min\left(\frac{R}{T} \frac{a}{\sin\theta}, 1\right) r \right] \tan\phi}{\sin\theta} \quad (\text{Equação 4})$$

Onde: “a” é a área específica da bacia (m^2/m); “C” é a coesão adimensional combinada dos solos e das raízes das árvores (N/m^2); “ θ ” é o ângulo da encosta ($^\circ$); “ ϕ ” é o ângulo de atrito interno ($^\circ$); “r” é a razão de densidade; e “R/T” é a recarga de água dividida pela transmissividade do solo (m^2/h).

Este modelo já foi aplicado na bacia hidrográfica da Ultrafêtil, localizada na Serra do Mar Paulista, município de Cubatão (SP), por Nery & Vieira (2015), para identificar áreas suscetíveis a escorregamentos, com aproximadamente 90% de acerto. A avaliação foi realizada a partir da construção de cenários (Figura 9), obtidos com dados da literatura (parâmetros geotécnicos) e de precipitação (banco de dados do Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo - DAEE). Em outros trabalhos nacionais que aplicaram o SINMAP, verificou-se que o modelo conseguiu correlação otimista entre os escorregamentos e as classes de instabilidade: 100% (PECHINCHA e ZAIDAN, 2013), 74% (CARDOZO *et al.*, 2018) e 63% (LOPES *et al.*, 2007).

O SINMAP pode ser considerado, conforme Fernandes (2016), um modelo semi-concentrado, pois apresenta variação em parâmetros (ex. ângulo da encosta), porém, constante para parâmetros de espessura do solo e de precipitação. O modelo tem como vantagem a aplicação exclusiva para escorregamentos rasos, tanto em escala de reconhecimento (1:20.000), como de detalhe (1:5.000). Sua principal limitação consiste na dependência da qualidade dos dados de entrada.

O modelo TRIGRS (*Transient Rainfall Infiltration and Grid-based Regional*) foi concebido para a produção de mapas de suscetibilidade a escorregamentos translacionais rasos deflagrados por chuvas torrenciais. Foi criado por Baum *et al.* (2002), visando o cálculo da oscilação do Fator de Segurança (FS) em distintas profundidades (z), de acordo com as alterações da carga de pressão (ψ) durante um episódio chuvoso. O TRIGRS baseia-se na combinação de um modelo hidrológico e outro de estabilidade (Equação 5),

proposta por Iverson (2000), a partir de uma rotina automatizada em programação Fortran (*Formula Translation*).

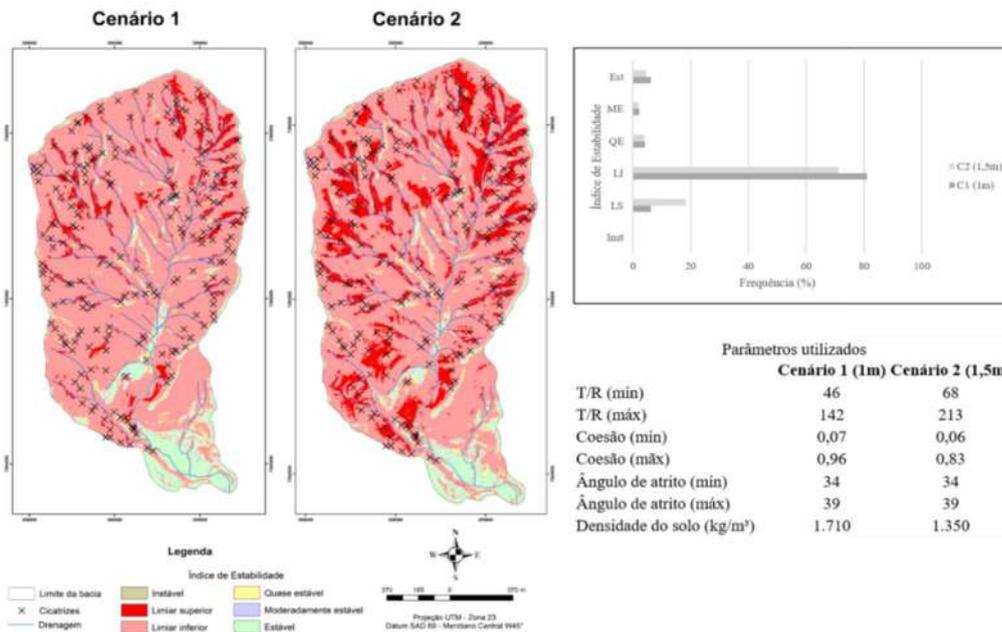


Figura 9. Exemplo de mapa do Índice de Estabilidade do SINMAP e os respectivos dados de entrada. O gráfico mostra a distribuição da frequência das classes de estabilidade do modelo. Nota-se para ambos os cenários que a classe “Limiar inferior” apresentou o maior percentual em relação às demais classes de condições preditivas instáveis. Fonte: autores.

Este modelo predispõe a presença de duas frentes de infiltração: uma permanente, que ocorre normalmente quando o solo está quase saturado (por meio de fluxo lateral, paralelo à encosta), e outro transiente, normal à superfície. À medida que o SHALSTAB e o SINMAP fundamentam-se em modelos de estabilidade relacionados a um modelo hidrológico do tipo *steady-state*, o TRIGRS considera a variabilidade do FS em profundidades diferenciadas, de acordo com a alteração na pressão da água no solo durante um episódio chuvoso. Em outras palavras, é transiente (BAUM *et al.*, 2002).

$$FS = \frac{\tan \phi}{\tan \theta} + \frac{c' - \psi(Z,t)\rho_w \tan \phi}{\rho_s Z \sin \theta \cos \theta} \quad (\text{Equação 5})$$

Onde: “ ϕ ” é o ângulo de atrito interno [°]; “ θ ” é o ângulo da encosta [°]; “ c ” é a coesão efetiva [kPa]; “ ψ ” é a carga de pressão [kPa]; “ Z ” é a profundidade do solo [m]; “ t ” é o tempo [s]; “ ρ_w ” é a densidade da água [kg/m³]; e “ ρ_s ” é a densidade do solo [kg/m³].

Dos parâmetros de entrada deste modelo, são necessários, primeiramente, os valores topográficos obtidos a partir de um MDT (mapas de ângulo da encosta e de direção de fluxo). Em seguida, são introduzidos os valores mecânicos e hidrológicos do solo (ex.: coesão, ângulo de atrito interno, profundidade, condutividade hidráulica, etc.), bem como, os valores pluviométricos (ex.: intensidade da chuva e duração acumulada ao final de cada evento chuvoso). Por fim, é preciso inserir alguns dados suplementares que

influenciam o TRIGRS, tais como o número de intervalos ao longo de uma espessura de solo em que são calculados os valores de carga de pressão e do Fator de Segurança (FS) (BAUM *et al.*, 2002).

Os valores gerados pelo MDT são inseridos por meio de arquivos em formato ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*). À depender da disponibilidade dos dados para cada área, os parâmetros mecânicos e hidrológicos podem ser concentrados ou distribuídos (via mapeamentos geoestatísticos). Para os valores pluviométricos, devem ser indicados o número de eventos, a intensidade da chuva, I_nZ , em mm/h, assim como, a duração de cada evento em segundos.

O TRIGRS foi utilizado por Godt *et al.* (2006) na área de Seattle (EUA), comumente atingida por escorregamentos translacionais, com danos sociais e econômicos. Na confrontação entre modelos distintos, Frattini *et al.* (2004) empregaram os modelos SHALSTAB e TRIGRS numa bacia hidrográfica italiana, abalada por aproximadamente 150 escorregamentos em 1998. Em relação aos escorregamentos, os autores averiguaram que o TRIGRS demonstrou resultados mais satisfatórios em proporção ao SHALSTAB, visto que reteve aproximadamente 70% das cicatrizes em áreas instáveis, enquanto o SHALSTAB, 60%. No Brasil, o TRIGRS já foi aplicado por Rabaco (2005), Listo *et al.* (2021), entre outros, todos com excelentes resultados de precisão, dos quais, é comum a geração de cenários com diferenças entre alguns parâmetros (ex. coesão do solo), visando-se avaliar aquele que apresentou melhor acurácia, sucesso de previsão e, portanto, mais próximo da realidade (Figura 10).

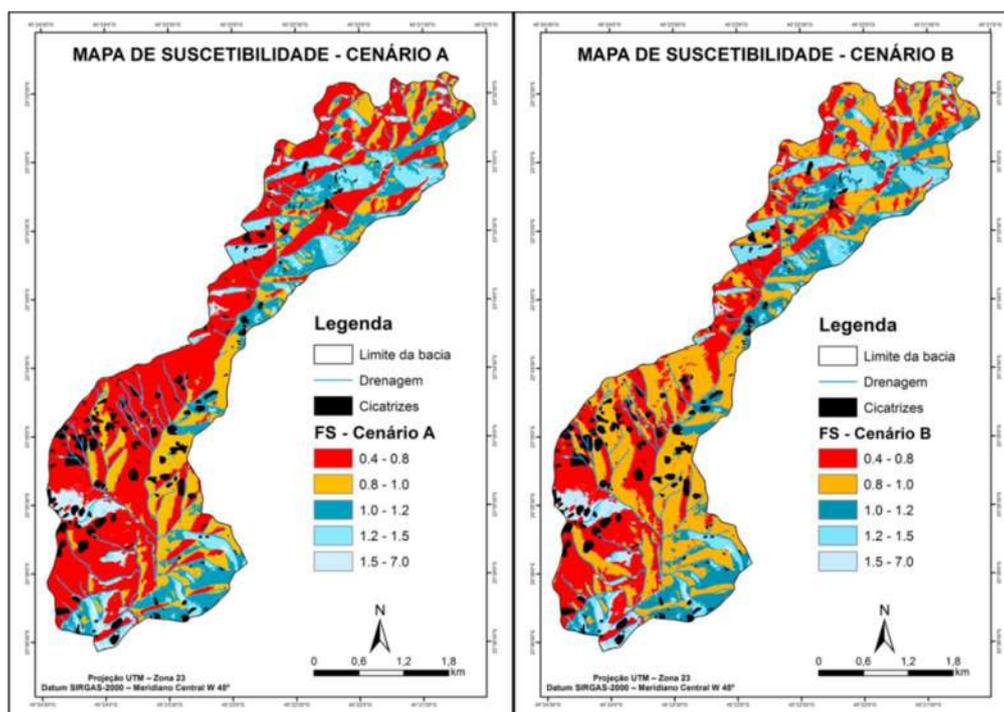


Figura 10. Exemplos de cenários de suscetibilidade gerados pelo modelo TRIGRS em uma bacia da Serra do Mar Paulista. No cenário A, foram utilizados os seguintes parâmetros mecânicos: $c' = 1\text{kPa}$; $\rho_s = 17,1\text{kg/m}^3$; $Z_{max} = 3\text{m}$; $\phi = 34^\circ$; $d = 3\text{m}$; $I_{LT} = 1,0 \times 10^{-9}\text{m/s}$; $D_0 = 5,5 \times 10^{-4}\text{m}^2/\text{s}$; e $K_s = 1,0 \times 10^{-6}\text{m/s}$. No cenário B, foram utilizados os seguintes parâmetros: $c' = 4\text{kPa}$; $\rho_s = 15\text{kg/m}^3$; $Z_{max} = 3\text{m}$; $\phi = 34^\circ$; $d = 3\text{m}$; $I_{LT} = 1,0 \times 10^{-9}\text{m/s}$; $D_0 = 5,5 \times 10^{-4}\text{m}^2/\text{s}$; e $K_s = 1,0 \times 10^{-5}\text{m/s}$. As classes com Fator de Segurança (FS) < 1 equivalem às áreas instáveis, que apresentaram variações entre os cenários, sobretudo, devido diferenciação da coesão (parâmetro de grande sensibilidade no modelo). Fonte: autores.

Conforme Baum *et al.* (2002) existem algumas limitações do modelo, tais como: (i) o modelo assume fluxo homogêneo saturado ou perto da saturação em solo isotrópico, não podendo ser aplicado em áreas com condições iniciais muito secas e anisotrópicas; (ii) os resultados finais são sensíveis às condições iniciais, principalmente, profundidade do lençol e taxa de infiltração; (iii) desconsidera-se o papel da evapotranspiração; (iv) a variação da carga de pressão ocorre apenas em função da profundidade e do tempo; e (v) o modelo de estabilidade assume como uniforme a profundidade e as propriedades mecânicas, com aplicação somente para escorregamentos rasos induzidos por eventos pluviométricos.

6. CONCLUSÃO

Existem diferentes métodos preditivos a movimentos de massa, especialmente escorregamentos, conforme abordados neste capítulo, que permitem o uso individual ou coletivo de técnicas qualitativas e quantitativas, indiretas e diretas, fundamentadas na avaliação dos parâmetros condicionantes dos processos, tanto no meio rural quanto urbano.

Apesar da previsão de escorregamentos ser complexa, pois são muitos os fatores deflagradores naturais e antrópicos, acredita-se que o conhecimento da instabilidade possua relevância científica para a sociedade, podendo evitar vítimas fatais e proteger estruturas urbanas.

A combinação de metodologias (inventários, modelos, etc.) pode estabelecer as circunstâncias para a previsão espacial dos processos. Contudo, ainda é difícil estabelecer uma previsão temporal nas técnicas desenvolvidas para movimentos de massa até o presente momento.

A acurácia dos parâmetros de entrada (topográficos, geotécnicos, hidrológicos, etc.) é fundamental para garantir melhores resultados em todos os métodos aqui apresentados.

Os inventários são ferramentas úteis na compreensão e na dinâmica dos processos em encostas íngremes, subsidiando, por exemplo, planos de contenção.

Os modelos matemáticos aqui apresentados possuem diferenças em suas estruturas matemáticas, sobretudo, em relação ao modelo hidrológico, à variável tempo e aos parâmetros pluviométricos.

Embora muitas cidades brasileiras possuam mapeamentos de áreas suscetíveis a escorregamentos, os acidentes com perdas humanas e materiais ainda são frequentes. Apesar da legislação atual (Lei Federal no 12.608/2012), ainda não se observa a utilização de modelos matemáticos, por exemplo, por órgãos públicos, para o monitoramento de áreas de risco, ordenamento do uso da terra e identificação de encostas instáveis.

Referências Bibliográficas

ABNT/ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1984). **NBR 6459: Solo-Determinação do Limite de Liquidez**. Rio de Janeiro, p.13.

ABNT/ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1984). **NBR 7180: Solo-Determinação do Limite de Plasticidade**. Rio de Janeiro, p.13.

ABNT/ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.(1984). **NBR 7181: Solo-Análise granulométrica**. Rio de Janeiro, p.13.

ABNT/ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.(2016). **NBR 9604: Abertura de poço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas- Procedimento**. Rio de Janeiro, p.9.

ALEOTTI, P. & CHOWDHURY, R. (1999). Landslides hazard assessment: summary review and new perspectives. **Bull Eng. Geol. Env.**, 58, 21-44.

ALEXANDER, D.E. (1993). **Natural Disasters**. University College London Press & Kluwer Academic Publishers, Dordrecht & Boston, p.632.

ALMEIDA FILHO, G.S. de; FARIA GOUVEIA, M.I.; CANIL, K. (1999). **Mapa de Suscetibilidade à erosão no Estado de São Paulo, Brasil**. Projeto Orientações para o Combate a Erosão no Estado de São Paulo. Período 1985 a 1997. São Paulo. DAEEMPT, p.11.

AMARAL JUNIOR, A.F. (2007). **Mapeamento Geotécnico aplicado a análise de processos de movimentos de massa gravitacionais: Costa Verde – RJ – Escala 1:10.000**. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Universidade de São Paulo, São Carlos, p.191.

ARONICA, G.T.; BIONDI, G.; BRIGANDI, G.; CASCONI, E.; LANZA, S.; ARTESE, S.; PERRELLI, M. (2018). Monitoring a landslide with high accuracy by total station: A DTM-based model to correct for the atmospheric effects. **Geosciences**, 46, 1-23.

ASTM D3080-04 (2004). **Método de Teste Padrão para Teste de Cisalhamento Direto de Solos Sob Condições Drenadas Consolidadas**. ASTM International, West Conshohocken, PA. Disponível em: www.astm.org. Acesso em <02/04/2020>

AUGUSTO FILHO, O. (1992). **Cartas de risco de escorregamentos: uma proposta metodológica e sua aplicação no município de Ilha Bela, SP. São Paulo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo – SP, p.162.

AVELAR, A.S.; LACERDA, W.A.; COELHO NETO, A.L. (2006). Mecanismos de iniciação de fluxos detríticos no maciço da Tijuca, Rio de Janeiro (RJ): o caso da encosta do Soberbo. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, 7, 73-83.

AYALA, I.A. (2002). Geomorphology, natural hazards, vulnerability and prevention of natural disasters in developing countries. **Geomorphology**, 47, 107-124.

BARLOW, J.; MARTIN, Y.; FRANKLIN, S.E. (2003). Detecting translational landslide scars using segmentation of Landsat ETM+ and DEM data in the northern Cascade Mountains, British Columbia. **Can. J. Remote Sensing**, 29, 510-517.

BAUM, R.L.; SAVAGE, W.Z.; GODT, J.W. (2002). **TRIGRS: A Fortran Program for Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability Analysis**. USGS. Colorado, p.35.

- BENDA, L.; VELDHUISEN, C.; BLACK, J. (2003). Debris flows as agents of morphological heterogeneity at low-order confluences, Olympic Mountains, Washington. **Geological Society of America**, 115, 1110-1121.
- BENZ, U.C.; HOFMANN, P.; WILLHAUCK, G.; LINGENFELDER, I.; HEYNEN (2004). Multi-resolution, object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information. **Photogrammetry & Remote Sensing**, 58, 239-258.
- BERNARDES, T.; REANI, R.; CONCEIÇÃO, R.; LUIS, R.; LOURENÇO, C.; CARNEIRO, R.; MEDEIROS, M.; SILVA, G. (2019). Flood and landslide events database for the municipalities monitored by Brazilian Center for Monitoring and Early Warnings of Natural Disasters. **Geophysical Research Abstracts**, 21, p.1824.
- BEVEN, K.J. & KIRBY, A. (1979). A physically based variable contributing area model of basin hydrology. **Hidrological Sciences Bulletin**, 24, 43-69.
- BISPO, C.O.; LISTO, F.L.R.; FALCAO, N.A.M.; LISTO, D.G.S. (2020). Previsão de escorregamentos no município de Maceió (AL) a partir do modelo AHP. **Revista do Departamento de Geografia (USP)**, 39, 88-101.
- BLASCHKE, T. (2010). Object based image analysis for remote sensing. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, 65, 2-16.
- BORTOLOZO, C.A.; MOTTA, M.F.B.; ANDRADE, M.R.M.; LAVALLE, L.V.A.; MENDES, R.M.; SIMÕES, S.J.C.; MENDES, T.S.G.; PAMPUCH, L.A. (2019). Combined analysis of electrical and electromagnetic methods with geotechnical soundings and soil characterization as applied to a landslide study in Campos do Jordão City, Brazil. **Journal of Applied Geophysics**, 161, 1-14.
- BRASIL (2012). **Lei Federal nº 12.608**. Institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil-PNPDEC. Brasília, 10 de abril de 2012.
- BRITO, M.M.; WEBER, E.J.; SILVA FILHO, L.C.P. (2017). Multi-Criteria Analysis Applied to Landslide Susceptibility Mapping. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, 18, 719-735.
- BRUNSDEN, D. & PRIOR, D.B. (1984). *Slope Instability*. John Wiley, Chichester, 620p.
- BUDETTA, P. (2010). Rockfall-induced impact force causing a debris flow on a volcanoclastic soil slope: a case study in southern Italy. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, 10, 1995-2006.
- CAMPBELL, R.H. (1975). **Soil slips, debris flows, and rainstorms in the Santa Monica Mountains and vicinity, southern California**. U.S. Geological Survey Professional Paper, 851, p. 51.
- CARDOZO, G.P.; LOPES, E.S.S.; MONTEIRO, A.M.V. (2018). Shallow landslide susceptibility assessment using SINMAP in Nova Friburgo, Rio de Janeiro, Brazil. **Revista Brasileira de Cartografia**, 70, 1206-1230.
- CARRARA, A.M.; CARDINALI, M.; GUZZETTI, F.; REICHENBACH, P. (1995). Gis Technology in Mapping Landslide Hazard. In: CARRARA, A. & GUZZETTI, F. (Eds.). **Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards**. 1 ed. Dordrecht: Springer. cap. 8, p. 135-175.

- CARVALHO, C.S.; MACEDO, E.S.; OGURA, A.T. (2007). **Mapeamento de riscos em encostas e margem de rios**. Brasília: Ministério das Cidades & Instituto de Pesquisas Tecnológicas. p.176.
- CENTRO DE ESTUDOS E PESQUISAS EM ENGENHARIA E DEFESA CIVIL/ EPED/UFSC (2012). **Atlas Brasileiro de Desastres Naturais: 1991 a 2012**. Volume Brasil. Florianópolis: CEPED-UFSC, p.94.
- CERRI, R.I.; ROSOLEN, V.; REIS, F.A.G.V.; FILHO, A.J.P.; VEMADO, F.; GIORDANO, L.C.; GABELINI, B.M. (2020). The assessment of soil chemical, physical, and structural properties as landslide predisposing factors in the Serra do Mar mountain range, Caraguatatuba, Brazil. **Bull. Eng. Geol. Environ**, 79, 3307–3320.
- CHENG, K.S.; WEI, C.; CHANG, S.C. (2004). Locating landslides using multi-temporal satellite images. **Advances Space Research**, 33, 296-301.
- COHENCA, D. & CARVALHO, R. (2015). **Comparação de métodos de classificação OBIA, Máxima Verossimilhança e Distância Mínima em imagem OLI/Landsat-8 em área de alta diversidade de uso do solo**. In: XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto-SBSR, João Pessoa/PB, p.1035-1042.
- COLLINS, B. & ZNIDARCIC, D. (2004). Stability analysis of rainfall induced landslides. **J. Geotech. Geoenviron. Eng.**, 130, 362-372.
- CRAWFORD, M.M.; ZHU, J.; WEBB, S.E. (2015). **Geologic, geotechnical, and geophysical investigation of a shallow landslide, Eastern Kentucky**. Report of Investigations, vol. 29, Series XII, p. 43.
- CROZIER, M.J. (1986). **Landslides: causes, consequences and environment**. New Hampshire: Croom Helm, p. 252.
- CRUDEN, D.M. & VARNES, D.J. (1996). Landslide types and processes. In: TURNER, K.A., SCHUSTER, R.L. **Landslides - Investigation and mitigation transportation**. Washington: Transportation Research Board, p. 36-75.
- DAVINO, A. (1970). Importância do método de eletrorresistividade na determinação da natureza e espessura do manto de decomposição em rochas cristalinas. **Boletim Sociedade Brasileira de Geologia**, 19, 99-101.
- DE PLOEY Y. & CRUZ, O. (1979). Landslides in the Serra do Mar, Brazil. **Catena**, 6, 111-122.
- DEB, S.K. & EL-KADI, A.I. (2009). Susceptibility assessment of shallow landslides on Oahu, Hawaii, under extreme-rainfall events. **Geomorphology**, 108, 219-233.
- DIETRICH, W.E. & MONTGOMERY, D.R. (1998). **A digital terrain model for mapping shallow landslide potential**. Geological Sciences. Seattle: NCASI. Disponível em: <http://calm.geo.berkeley.edu/geomorph/shalstab/index.htm>. Acesso em <13/05/2021>.
- DIETRICH, W.E.; WILSON, C.J.; MONTGOMERY, D.R.; MCKEAN, J. (1993). Analysis of erosion thresholds, channel networks and landscape morphology using a digital terrain model. **Journal of Geology**, 101, 259-278.

- DOMINGUES, E.N. (2001). Caracterização das feições erosivas e relações com o meio hidrobiológico em áreas impactadas da Serra do Mar, na região de Cubatão (SP). **Geociências**, 20, 61-71.
- DOURADO, F. & ROIG, H. (2013). Mapas de susceptibilidade a escorregamentos rasos, usando os modelos SHALSTAB e SINMAP, da bacia do rio Paquequer-Teresópolis- RJ. **Cadernos de Estudos Geoambientais**, 4, 56-66.
- FANNIN, R.J. & ROLLERSON, T.P. (1993). Debris flows: some physical characteristics and behavior. **Canadian Geotechnical Journal**, 30, 71-81.
- FELL, R.; COROMINAS, J.; BONNARD, C.; CASCINI, L.; LEROI, E.; SAVAGE, W. Z. (2008). Guideline for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. **Engineering Geology**, 102, 85-98.
- FERNANDES, N.F. (2016). Modelagem em Geografia Física: teoria, potencialidades e desafios. **Espaço Aberto**, 6, 209-247.
- FERNANDES, N.F. & AMARAL, C. P. (1996). Movimentos de Massa: uma Abordagem geológico-geomorfológica. In: GUERRA, A.J.T.; CUNHA, S.B. **Geomorfologia e Meio Ambiente**. 1 ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, p. 123-186.
- FERNANDES, N.F.; GUIMARAES, R.F.; GOMES, R.A.T.; VIEIRA, B.C.; MONTGOMERY, D.R.; GREENBERG, H. (2004). Topographic controls of landslides in Rio de Janeiro: field evidence and modeling. **Catena**, 55, 163-181.
- FERREIRA, F.S. (2013). **Análise da influência das propriedades físicas do solo na deflagração dos escorregamentos translacionais rasos na Serra do Mar (SP)**. Dissertação (Mestrado em Geografia Física), Universidade de São Paulo, São Paulo, p.100.
- FIORI, A.P. (1995). Fatores que influem na análise de vertentes e no movimento de massa em encostas. **Boletim Paranaense de Geociências**, 43, 1-13.
- FRATTINI, P.; CROSTA, G.B.; FUSI, N.; NEGRO, P.D. (2004). Shallow landslides in pyroclastic soils: a distributed modelling approach for hazard assessment. **Engineering Geology**, 73, 277-295.
- FREDLUND, D.G. (1987). Slope stability analyses incorporating the effect of soil suction. In: ANDERSON, M.G., RICHARDS K.S. (eds). **Slope Stability**. John Wiley: Chichester, p.113-144.
- GALLI, M.; ARDIZZONE, F.; CARDINALI, M.; GUZZETTI, F.; REICHENBACH, P. (2008). Comparing landslides inventory maps. **Geomorphology**, 94, 268-289.
- GLADE, T. (2005). Linking debris-flow hazard assessments with geomorphology. **Geomorphology**, 66, 189-213.
- GODT, J.W.; BAUM, R.L.; CHLEBORAD, A.F. (2006). Rainfall Characteristics for shallow landsliding in Seattle, Washington, EUA. **Earth Surface Process Landforms**, 31, 97-110.
- GODT, J.W. & COE, J.A. (2007). Alpine debris flows triggered by a 28 July 1999 thunderstorm in the central Front Range, Colorado. **Geomorphology**, 84, 80-97.

- GOMES, M.C.V. & VIEIRA, B.C. (2016). Saturated hydraulic conductivity of soils in a shallow landslide area in the Serra do Mar, São Paulo, Brazil. **Zeitschrift fur Geomorphologie**, 60, 53-65.
- GORSEVSKI, P.V.; GESSLER, P.E.; BOLL, J.; ELLIOT, W.J.; FOLTZ, R.B. (2006). Spatially and temporally distributed modeling of landslide susceptibility. **Geomorphology**, 80, 178-198.
- GRAMANI, M.F. (2001). **Caracterização Geológico-Geotécnica das Corridas de Detritos ("Debris Flows") no Brasil e Comparação com Alguns Casos Internacionais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia)-Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, p.372.
- GREENWAY, D.R. (1987). Vegetation and slope stability. In: ANDERSON, M.G. & RICHARDS, K.S. (Eds). **Slope Stability**. Chichester: John Wiley & Sons, p. 187-230.
- GUIDICINI, G. & NIEBLE, C.M. (1984). **Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação**. São Paulo: Edgard Blücher, p.196.
- GUIMARÃES, R.F.; FERNANDES, N.F.; GOMES, R.A.T.; CARVALHO JUNIOR, O.A. (2003). Fundamentação teórica do modelo matemático para previsão de escorregamentos rasos Shallow Stability. **Espaço & Geografia**, 6, 133-150.
- GUZZETTI, F.; MONDINI, A.C.; CARDINALI, M.; FIORUCCI, F.; SANTANGELO, M.; CHANG, K.T. (2012). Landslide inventory maps: new tools for an old problem. **Earth-Science Reviews**, 112, 42-66.
- HERVÁS, J.; BARREDO, J.I.; ROSIN, P.L.; PASUTO, A.; MANTOVANI, F.; SILVANO, S. (2003). Monitoring landslides from optical remotely sensed imagery: the case history of Tessina landslide, Italy. **Geomorphology**, 54, 63-75.
- HÖLBLING, D.; EISANK, C.; ALBRECHT, F.; VECCHIOTTI, F.; FRIEDL, B.; WEINKE, E.; KOCIU, A. (2017). Comparing manual and semi-automated landslide mapping based on Optical Satellite Images from different sensors. **Geosciences**, 37, 1-20.
- HUSSAIN, Y.; CARDENAS-SOTO, M.; UAGODA, R.; MARTINO, S.; RODRIGUEZ-REBOLLEDO, J.; HAMZA, O.; MARTINEZ-CARVAJAL, H. (2019). Monitoring of Sobradinho landslide (Brasília, Brazil) and a prototype vertical slope by time-lapse interferometry. **Brazilian Journal of Geology**, 49, 1-11.
- HUTCHINSON, J.N. (1986). Mass Movement. In: FAIRBRIDGE, R.W. (Ed.). **Encyclopedia of geomorphology**. New York: Reinhold, p. 688-695.
- HUTCHINSON J.N. (1988). General report: morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology. **Landslides**, 1, 3-35.
- INFANTI, N.J. & FORNASARI, N.F. (1998). Processos de Dinâmica Superficial. In OLIVEIRA, A.M. dos S. & BRITO, S.N.A. de. (org). **Geologia de Engenharia**. São Paulo: ABGE-CNPq- FAPESP, p.131-152.
- IPT/INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (1991). **Ocupação de encostas**. In: CUNHA, M.A. (coordenador). São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, p.91.

- IVERSON, R.M. (2000). Landslide triggering by rain infiltration. **Water Resources Research**, 36, 1897-1910.
- JELINEK, R. & WAGNER, P. (2007). Landslide hazard zonation by deterministic analysis (Vel'ká Čausa landslide area, Slovakia). **Landslides**, 4, 339-350.
- KANJI, M.A.; CRUZ, P.T.; MASSAD, F. (2008). Debris flow affecting the Cubatão Oil Refinery, Brazil. **Landslides**, 5, 71-82.
- KAYASTHA, P.; DHITAL, M.R.; DE SMEDT, F.A. (2013). Application of the analytical hierarchy process (AHP) for landslide susceptibility mapping: A case study from the Tinau watershed, west Nepal. **Computers & Geosciences**, 52, 398-408.
- KIEHL, E.J. (1979). **Manual de edafologia: Relações solo-planta**. São Paulo: Ceres, p.262.
- KIM, J.; JEONG, S.; PARK, S.; SHARMA, J. (2004). Influence of rainfall-induced wetting on the stability of slopes in weathered soils. **Engineering Geology**, 75, 251-262.
- KIM, M. S.; ONDA, Y.; UCHIDA, T.; KIM, J. K. (2016). Effects of soil depth and subsurface flow along the subsurface topography on shallow landslide predictions at the site of a small granitic hillslope. **Geomorphology**, 271, 40-54.
- KOBIYAMA, M.; MOTA, A.A.; GRISON, F.; GIGLIO, J.N. (2011). Landslide influence on turbidity and total solids in Cubatão do Norte river, Santa Catarina, Brazil. **Natural Hazards**, 59, 1077-1086.
- KUMAR, K.M.; ANNADURAI, R.; RAVICHANDRAN, P.T.; ARUMUGAM K. (2015). Mapping of landslide susceptibility using Analytical Hierarchy Process at Kothagiri Taluk, Tamil Nadu, India. **International Journal of Applied Engineering Research**, 10, 5503-5523.
- LACERDA, W.A. (2007). Landslide initiation in saprolite and colluvium in Southern Brazil: Field and laboratory observations, **Geomorphology**, 87, 104-119.
- LAN, H.X.; ZHOU, C.H.; WANG, L.J.; ZHANG, H.Y.; LI, R.H. (2004). Landslide hazard spatial analysis and prediction using GIS in the Xiaojiang watershed, Yunnan, China. **Engineering Geology**, 76, 109-128.
- LEE, S. & LEE, M.J. (2006). Detecting landslide location using KOMPSAT 1 and its application to landslide-susceptibility mapping at the Gangneung area, Korea. **Advances in Space Research**, 38, 2261-2271.
- LI, Z.; SHI, W.; MYINT, S.W.; LU, P.; WANG, Q. (2016). Semi-automated landslide inventory mapping from bitemporal aerial photographs using change detection and level set method. **Remote Sensing of Environment**, 175, 215-230.
- LISTO, F.L.R. (2011). **Análise da suscetibilidade e do grau de risco a escorregamentos rasos na Bacia do Alto Aricanduva, RMSP (SP)**. Dissertação (Mestrado em Geografia Física). Universidade de São Paulo, São Paulo, p.151.
- LISTO, F.L.R. & VIEIRA, B.C. (2012). Mapping of risk and susceptibility of shallow-landslide in the city of São Paulo, Brazil. **Geomorphology**, 169-170, 30-44.

- LISTO, F.L.R.; GOMES, M.C.V.; FERREIRA, F.S. (2021). Evaluation of shallow landslide susceptibility and Factor of Safety variation using the TRIGRS model, Serra do Mar Mountain Range, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, 107, 01-13.
- LOPES, E.S.S. & ARRUDA JUNIOR, E.R. (2015). Sensoriamento Remoto para Deslizamentos. In: SAUSEN, T.M.; LACRUZ, M.S.P. **Sensoriamento Remoto para desastres**. São Paulo: Oficina de Texto, p.213-248.
- LOPES, E.S.S.; RIEDEL, P.S.; BENTZ, C.M.; FERREIRA, M.V. (2007). Calibração e validação do índice de estabilidade de encostas com inventário de escorregamentos naturais na bacia do Rio da Onça na região da Serra de Cubatão, SP. São Paulo, UNESP, **Geociências**, 26, 83-95.
- LU, D.; MAUSEL, P.; BRONDIZIOS, E.; MORAN, E. (2004). Change detection techniques. **International Journal Remote Sensing**, 25, 2365-2407.
- MACIEL FILHO, C.L. (1997). **Introdução à Geologia de Engenharia**. Santa Maria: Editora UFSM, p.289.
- MANTOVANI, F.; SOETERS, R.; VAN WESTEN, C.J. (1996). Remote sensing techniques for landslides studies and hazard zonation in Europe. **Geomorphology**, 15, 213-225.
- MEIRELLES, E.O.; DOURADO, F.A.; COSTA, V.C. (2018). Análise multicritério para mapeamento da suscetibilidade a movimentos de massa na bacia do rio Paquequer- RJ. **GEOUERJ**, 33, 1-22.
- MEISINA, C. & SCARABELLI, S.A. (2007). Comparative analysis of terrain stability models for predicting shallow landslides in coluvial soils. **Geomorphology**, 87, 207-223.
- MENDES, R. M. (2008). **Estudo das propriedades geotécnicas de solos residuais não saturados de Ubatuba (SP)**. Tese (Doutorado em Engenharia Geotécnica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, p.236.
- MENDES, R.M.; ANDRADE, M.R.M.; TOMASELLA, J.; MORAES, M.A.E.; SCOFIELD, G.B. (2017). Understanding shallow landslides in Campos do Jordão municipality – Brazil: disentangle the anthropic effects from natural causes in the disaster of 2000. **Nat. Hazards Earth System Sciences**, 18, 15–30.
- MISHRA, S.; SHRIVASTAVA, P.; DHURVEY, P. (2017). Change Detection Techniques in Remote Sensing: A Review. **International Journal of Wirelles and Mobile Communication for Industrial systems**, 4, 1-8.
- MONTGOMERY, D.R. & DIETRICH, W.E. (1994). A physically based model for the topographic control on shallow landsliding. **Water Resources Research**, 30, 1153-1171.
- MOOSAVI, V.; TALEBI, A.; SHIRMOHAMMADI, B. (2014). Producing a landslide inventory map using pixed-based and object-oriented approaches optimized by Taguchi method. **Geomorphology**, 204, 646-656.
- NERY, T.D. & VIEIRA, B.C. (2015). 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**, 74, 369–378.

- O'LOUGHLIN, E.M. (1986). Prediction of surface saturation zones in natural catchments by topographic analysis. **Water Resources Research**, 22, 794-804.
- PACK, R.T.; TARBOTON, D.G.; GOODWIN, C.N. (1998). **SINMAP – a stability index approach to terrain stability hazard mapping**. User's Manual. Produced in ArcView Avenue and C++ for Forest Renewal B.C. under Research Contract No: PA97537-0RE. Canada: Terratech Consulting Ltd., Salmon Arm, B.C., p.68.
- PARISE, M. (2001). Landslide mapping techniques and their use in the assessment of the landslide hazard. **Physics and Chemistry, Earth**, 26, 697-703.
- PECHINCHA, M.G.H. & ZAIDAN, R.T. (2013). Probabilidade à ocorrência de escorregamentos na bacia do Córrego Matirumbide, Juiz de Fora, MG, a partir da utilização do modelo SINMAP. **Revista de Geografia**, 3, 1-18.
- PERDOMO, C.V. (2010). **Influência das propriedades físico-mecânicas e hídricas do solo na susceptibilidade a escorregamentos em vertente declivosa na Serra do Mar em Ubatuba**. Dissertação (Mestrado em Geografia), Universidade Estadual de Campinas, Campinas, p.138.
- PINTO, C.S. (2006). **Curso básico de mecânica dos solos**. São Paulo: Oficina de Textos, p.367.
- RABACO, L.M.L. (2005). **Avaliação de Modelos de Susceptibilidade a Movimentos Gravitacionais de Massa numa Faixa de Dutos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Computação). Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, p.162.
- RAFFO, J.G. DA G. (2012). O Processo Analítico Hierárquico e seu uso na modelagem do espaço geográfico. **Revista do Departamento de Geografia (USP)**, Volume Esp., 26–37.
- RAMOS, V.M.; GUIMARÃES, R.F.; REDIVO, A.L.; CARVALHO JUNIOR, O.A. (2003). Mapeamento das áreas susceptíveis a escorregamentos rasos no subúrbio ferroviário de Salvador (BA), utilizando os parâmetros físicos diferenciados para cada classe de solo. **GEOUERJ**, 1, 1966-1976.
- REIS, S.; YALCIN, A.; ATASOY, M.; NISANCI, R.; BAYRAK, T.; ERDURAN, M.; EKERCIN, S. (2012). Remote sensing and GIS-based landslide susceptibility mapping using frequency ratio and analytical hierarchy methods in Rize province (NE Turkey). **Environmental Earth Sciences**, 66, 2063-2073.
- RICKENMANN, D. & ZIMMERMANN, M. (1993). The 1987 debris flows in Switzerland: documentation and analysis. **Geomorphology**, 8, 175-189.
- RIGHES, A.; LOVATO, T.; SOARES, E. (1983). Caracterização física, química e microbiológica de um planossolo da unidade de mapeamento Vacaí, RS. **Ciência Rural**, 13, 25-45.
- SAATY, T.L. (1991). **Método de Análise Hierárquica**. São Paulo: Ed. McGraw-Hill, p.367.
- SANTOS, E.M. (2020). **Aplicação do modelo SHALSTAB na previsão de escorregamentos no município de Camaragibe, Região Metropolitana do Recife**.

Dissertação (Mestrado em Geografia), Universidade de Federal de Pernambuco, Recife, p. 89.

SCHJONNING, P. (1991). Soil strength as influenced by texture, water content and soil management. **Soil Till. Res.**, 12, 277-283.

SELBY, M.J. (1993). **Hillslope materials and processes**. New York: Oxford University Press, p. 45-116.

SENDIR, H. & YILMAZ, I. (2002). Structural, geomorphological and geomechanical aspects of the Koyulhisar landslides in the North Anatolian Fault Zone (Sivas, Turkey). **Environmental Geology**, 42, 52-60.

SESTINI, M.F. & FLORENZANO, T.G. (2004). Caracterização de cicatrizes de deslizamentos por Processamento de Dados TM Landsat em Caraguatatuba, SP. **Revista do Instituto de Geociências**, 4, 57-69.

SHAHABI, H.; KHEZRI, S.; AHMAD, B. B.; HASHIM, M. (2014). Landslide susceptibility mapping at central Zab basin, Iran: A comparison between analytical hierarchy process, frequency ratio and logistic regression models. **Catena**, 115, 55-70.

SHARPE, C.F.S. (1938). **Landslides and related phenomena: a study of mass movements of soil and rock**. New York: Pageant Books, p.125.

SHOAEI, G. & SIDLE, R.C. (2009). Variation in soil characteristics and hydrologic properties associated with historic land use near a recent landslide, Nagano Prefecture, Japan. **Geoderma**, 153, 37-51.

SIDLE, R.C.; PEARCE, A.J.; O'LOUGHLIN, C.L. (1985). **Hillslope stability and land use**. Washington: American Geophysical Union, p.140.

SILVA JUNIOR, C.H.L.; BEZERRA, D.S.; ANDERSON, L.O.; ANDRADE, M.R.M.; PEREIRA, D.C.A.; BEZERRA, V.L.A.R.; SILVA, F.B.; ARAGAO, L.E.O.C. (2016). Zoneamento de Susceptibilidade a Deslizamentos Induzidos em Bacias Hidrográficas com Base na Lógica Fuzzy e no Processo Analítico Hierárquico (AHP): O Caso da Bacia Hidrográfica do Rio Anil, São Luís-MA. **Revista Brasileira de Cartografia**, 68, 1819-1837.

SIMÕES, S.J.C.; GOMES, L.; MENDES, R.M.; MENDES, T.S.G. (2016). SIG e modelos de escorregamentos: avaliando métodos para reduzir as incertezas de dados de solo e precipitação. **Revista Brasileira de Cartografia**, 9, 1737-1746.

SUN, W.; TIAN, Y.; MU, X.; ZHAI, J.; GAO, P.; ZHAO, G. (2017). Loess landslide inventory map based GF-1 Satellite Imagery. **Remote Sensing**, 314, 1-17.

TEIXEIRA, M.; BATEIRA, C.; MARQUES, F.; VIEIRA, B.C. (2014). Physically based shallow translational landslide susceptibility analysis in Tibo catchment, NW of Portugal. **Landslides**, 12, 455-468.

TERHORST, B. & KREJA, R. (2009). Slope stability modelling with SINMAP in a settlement area of the Swabian Alb. **Landslides**, 6, 309-319.

TERZAGUI, K. (1925). **Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer grundlage**. Viena: Franz Deuticke, p. 1883-1963.

- TERZAGUI, K. (1967). Mecanismos dos escorregamentos de terra. **Revista Politécnica da USP**, 41, 1-41.
- TIWARI, B. & MARVI, H. (2004). Objective oriented multi-stage ring shear test for the strength of landslide soil. **Journal of Geotech and Geoenviron. Eng.**, 130, 217-222.
- TOFANI, V.; BICOCCHI, G.; ROSSI, G.; SEGONI, S.; D'AMBROSIO, M.; CASAGLI, N.; CATANI, F. (2017). Soil characterization for shallow landslides modeling: a case study in the Northern Apennines (Central Italy). **Landslides**, 14, 755-770.
- TRIGILA, A.; IADANZA, C.; SPIZZICHINO, D. (2010). Quality assessment of the Italian Landslide Inventory using GIS processing. **Landslides**, 7, 455-470.
- VAN STEIJN, H. (1996). Debris-flow magnitude-frequency relationships for mountainous regions of Central and Northwest Europe. **Geomorphology**, 15, 259-273.
- VAN WESTEN, C.J.; CASTELLANOS ABELLA, E.A.; KURIAKOSE, S.L. (2008). Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: An overview. **Engineering Geology**, 102, 112-131.
- VANACÔR R.N. & ROLIM S.B.A. (2012). Mapeamento da suscetibilidade a deslizamentos usando técnicas de estatística bivariada e sistema de informações geográficas na região nordeste do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, 13, 15-28.
- VARNES, D.J. (1978). Slope movement types and processes. In: KRIZEK, S. (ed). **Landslides: analysis and control**, cap. 2. Washington: National Academy of Sciences, p. 11-33.
- VESTENA, L.R. (2010). Mapeamento da suscetibilidade a deslizamentos na bacia hidrográfica do Caeté, Alfredo Wagner, SC. **Mercator**, 19, 175-190.
- VIEIRA, B. C. (2007). **Previsão de escorregamentos translacionais rasos na Serra do Mar (SP) a partir de modelos matemáticos em bases físicas**. Tese (Doutorado em Geografia), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, p.193.
- VIEIRA, B.C.; FERREIRA, F.S.; GOMES, M.C.V. (2015). Propriedades físicas e hidrológicas dos solos e os escorregamentos rasos na Serra do Mar Paulista. **RA'E GA: o Espaço Geográfico em Análise**, 34, 269-287.
- WANG, G. & SASSA, K. (2003). Pore-pressure generation and movement of rainfall-induced landslides: effects of grain size and fine-particle content. **Engineering Geology**, 69, 109-125.
- WOLLE, C.M. & CARVALHO, C.S. (1989). Deslizamentos em encostas na Serra do Mar - Brasil. **Solos e Rochas**, 12, 27-36.
- WOLLE, C.M. & CARVALHO, C.S. (1994). Taludes Naturais. In: FALCONI, F.F., JUNIOR, A.N. (Org.). **Solos do Litoral de São Paulo**. cap.8. São Paulo: ABMS, p.180-203.
- YILMAZ, I. & KESKIN, I. (2009). GIS based statistical and physical approaches to landslide susceptibility mapping (Sebinkarahisar, Turkey). **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, 68, 459-471.

ZARUBA, Q. & MENCL, V. (1976). **Landslides and their control**. Amsterdam: Elsevier, p.205.