



Mapas de susceptibilidade a escorregamentos rasos, usando os modelos Shalstab e Sinmap, da bacia do rio Paquequer – Teresópolis – RJ

F. Dourado^{1,2}, H. Roig¹ & P.T.L. Menezes¹

1 UERJ – Universidade do Estado do Rio de Janeiro - Faculdade de Geologia – Departamento de Geologia Aplicada - Rua São Francisco Xavier, 524 - Maracanã - Rio de Janeiro - Cep: 20550-900.

Telefone: 2587-7728 <http://www.uerj.br> - henrique.roig@mme.gov.br - ptarso@uerj.br

2 DRM-RJ – Departamento de Recursos Minerais do Estado do Rio de Janeiro

Coordenadoria de Geoinformação¹ - Rua Marechal Deodoro, 351 - CEP: 24030-060 Niterói - RJ.

Tel: 21 26202525 <http://www.drm.rj.gov.br> - fdourado@drm.rj.gov.br

Abstract Natural hazards such as volcanic eruptions, hurricanes, tsunamis and landslides, are processes of the Earth's dynamic that modify the landscape and affect directly all life. In Brazil, landslides are the most numerous natural hazards and cause big economic prejudice and social damages. The Southeastern region of Brazil is the area with biggest number of accidents and fatal victims. The prevention could be save financial resources and human lives that are lost in these catastrophes. The world-wide scientific community develops diverse models objectifying to foresee the areas of susceptibility to the occurrence of these disasters. In this work was analyzed susceptibility the flat translational landslides through models SHALSTAB and SINMAP. Was choosing the basin of the Paquequer River in Teresópolis – RJ as study case. The SINMAP model showed, for the study area, correlation of up to 47%, almost five times bigger than results showed by SHALSTAB model (they had presented in maximum 10%). In the case of changed cartographic base scale from 1:50.000 to 1:10.000, the correlation index between the landslides susceptible areas calculated by the models and the landslides scars add up to 10% in correlation. The low correlation between the susceptibility class and the landslides scars was caused by following reasons: limitations of the models, absence of soil type's classification and their parameters, anthropic influence and the susceptibility classification weren't adjusted to the Brazilian tropical conditions. Comparative analysis between models and scales shows that SINMAP model presented the best relation between cost and benefits, for building susceptibility landslides maps.

Keywords: landslide, modeling, geoprocessing, Paquequer river, Teresópolis.

INTRODUÇÃO Todos os anos, no período das chuvas, dezenas de vidas são perdidas e milhares de dólares são gastos em acidentes relacionados a desastres naturais. Os desastres naturais (escorregamentos, tsunamis, terremotos, erupções, secas, inundações etc.) são bem mais comuns e danosos do que o grande público imagina. Relatórios anuais da defesa civil da ONU registram bilhões de dólares em prejuízos (WP/WLI 1990 e 1994).

O Brasil é um país onde os desastres naturais consomem muitos recursos financeiros, em especial na região Nordeste, devido à seca, na região Sudeste com os escorregamentos e na região Sul com as inundações.

Escorregamentos de massa são processos naturais associados à dinâmica externa da Terra, sendo um dos responsáveis pela modelagem da paisagem. São movimentos gravitacionais rápidos, normalmente desenvolvidos no manto de alteração das rochas (Guerra *et al.* 1999, Taioli & Cordani, 2000).

O escorregamento de massa translacional raso é um tipo específico de escorregamento, onde em geral o pacote de material que desliza, em movimentos rápidos e de curta duração, é limitado por uma descontinuidade plana que pode ser, por exemplo, o contato entre duas camadas de solos distintos (colúvio e elúvio) ou o limite entre manto de alteração e a rocha sã (Guidicini & Nieble 1984, Augusto Filho 1992, WP/WLI 1994, Fernandes & Amaral 1996).

Na região sudeste, o estado do Rio de Janeiro é um dos que mais sofre com os escorregamentos de massa. No estado, a região metropolitana da cidade do Rio de Janeiro (monitorada pela GeoRIO) e a região serrana (ainda sem monitoramento).

LOCALIZAÇÃO DA ÁREA A área de estudo, a bacia do rio Paquequer, fica situada na porção oeste do município de Teresópolis, no estado do Rio de Janeiro, na qual está inserida a principal área urbana do município. Encontra-se limitada pelas coordenadas 22°12'56" a 22°28'35" de latitude e 42°52'53" a

43°03'19" de longitude (Fig. 1). Possui uma área aproximada de 269,01 km² e sua altitude varia entre 699 e 2218 metros. O rio Paquequer é afluente do rio Preto, que por sua vez faz parte da bacia do rio Paraíba do Sul.

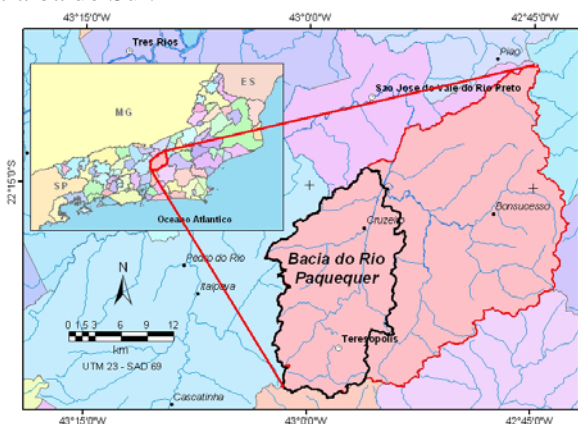


Figura 1. Mapa de localização da bacia do rio Paquequer

OS MODELOS Uma forma para tentar prever esse tipo de acidente é a criação de mapas de áreas susceptíveis a escorregamentos de massa. Esses mapas constituem-se em importantes ferramentas para o planejamento territorial e gestão municipal. Normalmente, são baseados em modelos matemáticos, que podem ser divididos em dois grupos: os modelos estocásticos e os modelos determinísticos.

No primeiro grupo, a probabilidade de um escorregamento ocorrer é calculada por meio do cruzamento de informações (uso e ocupação do solo, geologia, geomorfologia etc.) baseado na análise dos dados históricos sobre o fenômeno. Uma escala de probabilidade de ocorrência é definida a partir da ponderação de peso atribuído a cada parâmetro, que pode ser orientada pelo dado (*data-driven*) ou pelo usuário (*knowledge-driven*) (Bonham-Carter 1994, Braghin 1998, Gonzales 2000, Crosta & Souza Filho 2003). A cada intervalo de notas atribui-se uma classe de risco, como por exemplo, alto, médio e baixo risco.

No segundo grupo, no qual focamos esse trabalho, a probabilidade de ocorrência do escorregamento é calculada levando-se em consideração os parâmetros físicos do meio. A partir dos valores resultantes do modelo defini-se um limite de segurança, a partir do qual a área é considerada susceptível ao deslizamento e é definida como Área de Risco (Dietrich *et al.* 1993, Montgomery & Dietrich 1994, Montgomery & Dietrich 1994, Lee 2002, Guimarães 2003, Fernandes 2004). Os modelos SHALSTAB (Dietrich *et al.* 1998) e SINMAP (Pack *et al.* 1998(a), Pack *et al.* 1998(b)) comparados neste trabalho fazem parte desse grupo.

METODOLOGIA As bases cartográficas utilizadas no trabalho foram:

- Cartas Topográficas na escala 1:50.000 - Folhas Itaipava, Teresópolis, Friburgo, Antas e Duas Barras, confeccionadas pelo IBGE no início da década de setenta.

- Fotografias aéreas dos anos de 1956 e 1958 na escala 1:33.000, do ano de 1976 na escala 1:40.000, do ano de 1994 na escala de 1:8.000 disponibilizadas pela Prefeitura de Teresópolis, ortofotos de 2004 na escala 1:10.000 Imagens do satélite do SPOT-3 de 1996, satélites Landsat 5 e 7, para o período de 1997 a 2000 e do satélite IKONOS, datada de 2000.

- Mapas geológicos do mapeamento geológico sistemático do estado do Rio de Janeiro realizado pelo DRM-RJ, chamado Carta Geológica do Estado do Rio de Janeiro.

- A base de escorregamentos históricos da dissertação de mestrado de Gonzales (2000) intitulada "Aplicação de métodos de geoprocessamento para o estudo da instabilidade de encostas no município de Teresópolis - RJ" que contava com 272 (duzentos e setenta e duas) ocorrências de escorregamentos de massa.

Usando a base histórica como referência, a partir das imagens de satélites IKONOS e as ortofotos com escala de 1:10.000, cicatrizes de escorregamentos foram mapeadas e cadastradas em uma base de dados para a validação dos modelos. Para situações onde existia dúvidas ou a região estava coberta por nuvens foram utilizadas as fotografias aéreas na escala de 1:8.000, 1:33.000 e 1:40.000 e as imagens dos satélites SPOT e Landsat.

Dentro desse contexto as unidades geológicas encontradas na área são: i) Complexo Rio Negro – constituído de gnaisses migmatíticos, caracterizados pelas estruturas estromáticas, predominantemente composto de leucossoma bi-gnaiss de grão médio a pegmatóide e melanossoma anfibolítico. Esse Complexo é constituído por duas unidades, a primeira caracterizada por gnaisses migmatíticos (PeVnm), e a segunda por gnaisses tonalíticos (PeVrng) ou ho-bi-gnaiss (UERJ/IBGE 1999); ii) Batólito Serra dos Órgãos - as litologias desse batólito podem ser agrupadas em duas unidades: os granitos (Pegrgrd) e leucogranito gnáissicos (Pelgr) de grão médio a grosseiro, (UERJ/IBGE 1999); iii) Granito Teresópolis - a unidade é composta por rochas graníticas pós-tectônicas intrusivas. É composta por duas fácies principais: Granito Teresópolis de Grão Médio (GrM) e Granito Teresópolis de Grão Fino (GrF); iv) Diques Básicos (Ktb) - a região da bacia apresenta espessos diques, de idade K-Ar em rocha



total variando entre 126 e 141 Ma (Conceição *et al.*, 1998), com direção predominante NE. Os litotipos são formados por basaltos, diabásios e microgabros; v) Coberturas Aluvionares e Depósitos de Encosta (Q) - são depósitos sedimentares de idade quaternária, geralmente formados nas margens dos rios na forma de terraços ou em suas planícies de alagamento. Esses sedimentos são arenosos, de granulometria de média a fina, associadas às lentes argilosas e níveis de cascalhos (UERJ/IBGE 1999).

Usando a base cartográfica na escala 1:50.000, foi gerado um *grid*, com algoritmo de interpolação *Topo to raster* (específico para análise hidrológica) do programa ArcGis 9.0, de resolução espacial de 10 metros. A partir dessa base foram gerados outros *grids*: declividade, orientação da vertente (aspecto), forma de relevo, área de contribuição (fluxo distribuído e fluxo multidirecional) e os de susceptibilidade.

Na modelagem foram utilizados os seguintes valores como constantes: $g = 9,8 \text{ m/s}^2$, $\rho_{\text{solo}} = 2000 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{\text{água}} = 1000 \text{ kg/m}^3$, ângulo de atrito = 45° e espessura do solo = 2000 mm.

RESULTADOS De um total inicial de 272 cicatrizes, durante a interpretação das imagens de satélite e fotografias aéreas foram identificadas 124 cicatrizes. Somam-se a essas, 27 novos movimentos de massa observados em trabalhos de campo.

Correlacionando-se as cicatrizes com a litologia, observou-se que apesar do maior número de escorregamentos no granito do Batólito Serra dos Órgãos (65), é a unidade Rio Negro migmatítica (PeVnm) que apresenta a maior densidade de escorregamentos (em função da área), ultrapassando um escorregamento por quilometro quadrado.

Litologia	Ocorrências	%	Ocorrências/km ²
PeVmg	33	21,9	0,44
PeVnm	14	9,3	1,12
Pegrgr	65	43,0	0,62
Pelgr	36	23,8	0,62
GrF	2	1,3	0,16
GrM	1	0,7	0,38
Ktb	0	0,0	0,00
Q	0	0,0	0,00
Total	151	100,0	0,56

Tabela 1. Distribuição dos escorregamentos históricos x litologia

Na correlação entre os escorregamentos históricos e o *grid* de declividade, a baixa correlação entre os

altos gradientes (maior que 45°) se dá pela pouca espessura do solo nessas declividades.

Declividade	Ocorrências	%	Área (m ²)	%
0-5	6	4	19188219	7
5-15	24	16	131569434	49
15-30	84	56	47625200	18
30-45	34	23	65686702	24
> 45	3	2	5537220	2

Tabela 2. Declividade x escorregamentos históricos

Também foi calculada a relação entre os escorregamentos e a orientação das vertentes. Na tabela 3 observou-se uma leve tendência nos escorregamentos para a vertente a esse.

Aspecto	Ocorrências	%	Área (m ²)	%
N	37	25	72078310	27
E	48	32	63385596	24
S	41	27	71853392	27
W	25	17	62283592	23

Tabela 3. Aspecto x escorregamentos históricos

Quanto ao *grid* de forma de relevo foi observado que a relação entre o número de escorregamentos históricos e as formas côncavas e convexas foi equilibrada, bem próximo da relação 1 para 1.

Forma	Ocorrências	%	Área (m ²)	%
Concavo	70	46	41841945	16
Plano	15	10	184864873	69
Convexo	66	44	42695442	16

Tabela 4. Forma x escorregamentos históricos

No *grid* gerado pelo SHALSTAB (Fig. 2), a maior parte da bacia é classificada como altamente estável (com quase quatro vezes mais área do que a segunda maior classe, a pouco estável). As cinco demais classes (estável, moderadamente estável, pouco estável, moderadamente instável ou instável) ocupam juntas, um pouco menos que 50% da área. Pode-se observar a distribuição das cicatrizes de escorregamento nas classes susceptibilidade (área de contribuição x declividade x índice de umidade) no Gráfico 1.

Para o SINMAP (Fig. 3) a classe predominante é também a altamente estável, ocupando 38% da área. O gráfico de distribuição de classes equivalente para esse modelo é o Gráfico 2.

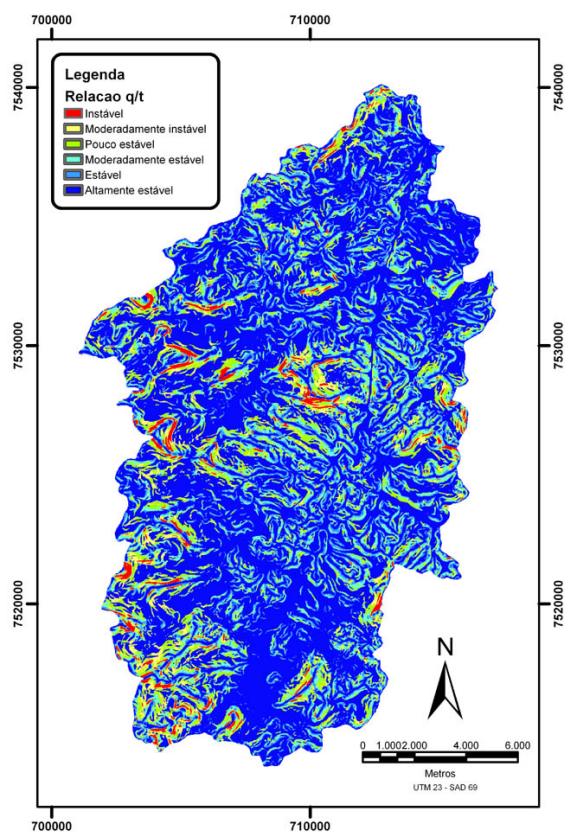


Figura 2. Mapa de Susceptibilidade a Escorregamentos de Massa da bacia do rio Paquequer utilizando o modelo SHALSTAB

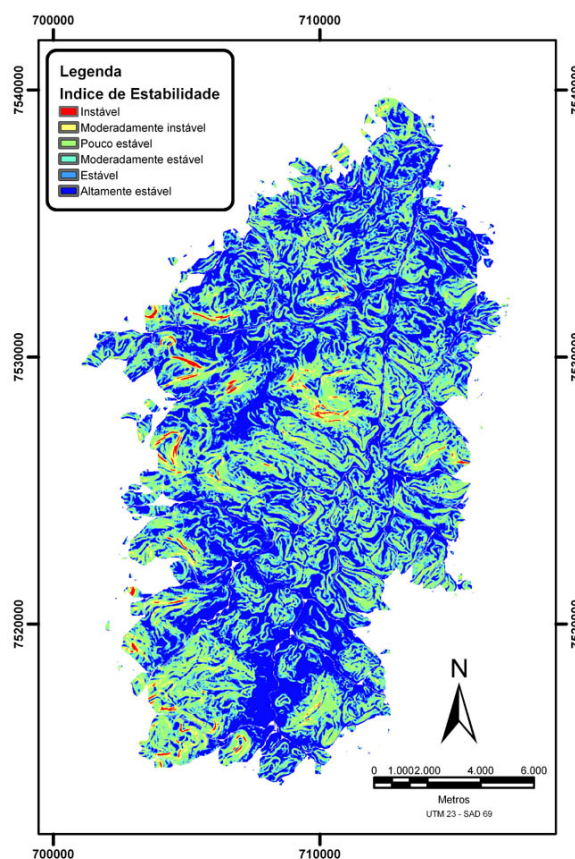


Figura 3. Mapa de Susceptibilidade a Escorregamentos de Massa da bacia do rio Paquequer utilizando o modelo SINMAP

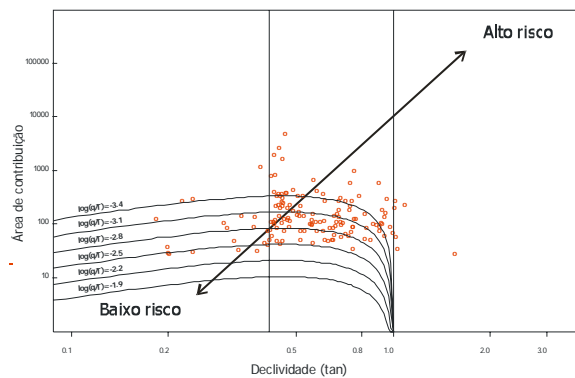


Gráfico 1. Distribuição das cicatrizes de escorregamento nas classes susceptibilidade geradas pelo modelo SHALSTAB

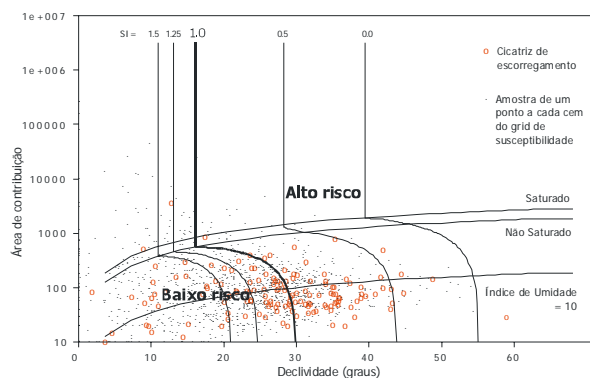


Gráfico 2. Distribuição das cicatrizes de escorregamento nas classes susceptibilidade geradas pelo modelo SINMAP

Classe	SINMAP	%	SHALSTAB	%
Instável	1	1	3	2
Mod. instável	6	4	8	5
Pouco estável	48	32	4	3
Mod. estável	26	17	24	16
Estável	21	14	36	24
Altamente estável	49	32	76	50

Tabela 5. Modelos SHALSTAB x SINMAP



DISCUSSÕES O motivo de 127 cicatrizes descritas por Gonzales (2000) não serem localizadas se deu devido à dificuldade na identificação das cicatrizes, em função da regeneração da vegetação ou das intervenções antrópicas ou mesmo a interpretação equivocada de Gonzales.

A interpretação para essa relação mais positiva é que ela se dá devido litologia (PeVrnm) ter passado por esforços compressivos elevados que além de uma forte foliação, gerou minerais com uma maior susceptibilidade à alteração intempérica. A alta correlação das cicatrizes de escorregamento e as declividades ente 15 e 30° é explicada na literatura pela maior espessura do solo (Guerra 1994).

Esperava-se uma maior tendência de escorregamentos para a vertente sul devido à nítida relação da vegetação mais densa e sua correlação a solos mais espessos e menor para norte onde são observadas a maioria das escarpas de rocha exposta.

Na correlação entre os escorregamentos e a forma do relevo, era esperada uma correlação tendendo para um número maior nas áreas com forma côncava, visto que para esse tipo de forma há a convergência de fluxo, aumentando a saturação e subseqüentemente a poro-pressão.

Em ambos os modelos de susceptibilidade as áreas de maior susceptibilidade estão intimamente relacionadas às áreas de maior declividade e por consequência as áreas de afloramento rochoso. O fato dos modelos de susceptibilidade usar dois modelos de estabilidade diferentes é o principal fator que gera as discrepâncias entre os resultados. Outro fator, que gera essas diferenças, é o fato dos métodos de cálculo da área de contribuição também serem diferentes: no caso do SHALSTAB o método distribuído, enquanto o SINMAP usa um método chamado método multidirecional. Podemos afirmar que os critérios usados pelos modelos (Dietrich *et al.* 1993, Pack 1998a) para estabelecer as classes de susceptibilidade podem ser ajustados, utilizando como base de aferição uma área muito bem estudada, visando diminuir a discrepância entre os resultados dos modelos.

CONSIDERAÇÕES FINAIS Comparativamente, entre os modelos, os melhores resultados de correlação entre as classes mais instáveis (instável, moderadamente instável, e pouco estável) foram do modelo SINMAP. Devemos destacar que a correlação entre as cicatrizes de escorregamentos históricos e as classes de alta susceptibilidade a escorregamentos nos *grids* gerados pelos modelos foi muito baixa,

chagando no máximo a 37%. Essa baixa correlação está relacionada aos seguintes motivos:

- limitações dos modelos – Os modelos usados foram desenvolvidos para um tipo específico de escorregamento de massa: os translacionais rasos, que são o tipo mais abundante na bacia, porém não o único. Dessa forma, sugerimos duas opções: a) Nessa modelagem se utilize apenas cicatrizes desse tipo de escorregamento; ou b) Opte-se por um outro modelo que seja válido para diversos tipos de escorregamento;

- discretização dos tipos de solo e seus parâmetros físicos – Os modelos da forma que são disponibilizados na Internet, não permitem a discretização dos diferentes tipos de solo e seus parâmetros físicos. Sugere-se que seja desenvolvida uma rotina que esses parâmetros sejam carregados no modelo por meio de mapas, como por exemplo: coeficiente de atrito e densidade a partir do mapa de solos;

- influência antrópica – Os modelos não consideram a influência antrópica no cálculo. No mapa de escorregamentos históricos é notória a concentração de cicatrizes na área urbana, o que não é observado nos mapas de susceptibilidade. Nesse caso a sugestão é a aplicação de um fator multiplicador para as manchas urbanas, desse modo aumentando a susceptibilidade da área, e

- a classificação da susceptibilidade – os índices numéricos (SI e q/t) relacionados a classificações empíricas de susceptibilidade a escorregamento (ex.: pouco instável muito estável etc.) não estão adequados às condições tropicais brasileiras. Nesse caso, a melhor alternativa é usar uma área muito bem estudada tanto em seus parâmetros físicos de solo, como na morfologia e dos escorregamentos históricos, para usar como base de aferição e ajuste das classes baseadas nesses índices.

Conclui-se então, que antes de usar algum desses modelos, mais estudos devem ser realizados, visando otimizar esse procedimento, pois da forma atual esses *grids* só podem ser usados associados a outras informações como um indicativo no auxílio do planejamento de ordenamento territorial, trazendo apenas subsídios para desenvolvimento de ações de prevenção nas áreas mais susceptíveis. É importante frisar também, que as áreas classificadas como “não crítica” não estão isentas da ocorrência desses fenômenos.

Agradecimentos Os autores agradecem ao LABGIS, a Marcelo Gonzales e a AMPLA pelos dados cedidos. Ao DRM-Serviço Geológico do Rio de Janeiro, que forneceu dados e apoio logístico de campo.



Referências

- AUGUSTO FILHO O. 1992. Caracterização geológica-geotécnica voltada à estabilização de encostas: uma proposta metodológica. Conferência brasileira sobre estabilidade de encostas, 1, Rio de Janeiro. *Anais*. Rio de Janeiro: ABGE v.2, pp.721-33.
- BRAGHIN M.A. 1998. *Utilização das lógicas Booleana e Fuzzy para análise metalogenética na folha Pilar do Sul (SP) via sistema de informações geográficas*. Campinas,. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Campinas. 122p.
- BONHAM-CARTER H. 1994. *Geographic information systems for geoscientists: modelling with GIS*. Pergamon Press Oxford, IX, 398 p.
- CONCEIÇÃO F.R., TUPINAMBÁ M., HEILBRON M. 1998. O enxame cretácico de diques básicos granofíricos da Serra dos Orgãos, Estado do Rio de Janeiro. In: Congresso Brasileiro De Geologia, 40, 1998, Belo Horizonte. *Anais...*Belo Horizonte: SBG, p. 481.
- CRÓSTA A.P., SOUZA FILHO C.R. 2003. Geotecnologias Aplicadas à Geologia, *Revista Brasileira de Geociências*, **33**(2 – Suplemento):227.
- DIETRICH W.E. & MONTGOMERY D.R. 1998. *SHALSTAB: A Digital Terrain Model for Mapping Shallow Landslide Potencial*, NCASI (National Council of the Paper Industry for Air and Stream Improvement), Technical Report, 29 p.
- 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. *The Journal of Geology*, **101**:259-278.
- FERNANDES N.F. & AMARAL C.P. 1996. Movimentos de Massa: Uma Abordagem Geológico-Geomorfológica. In A.J.T. GUERRA & S.B. CUNHA (eds.) *Geomorfologia e Meio Ambiente*, Bertrand, Rio de Janeiro, pp. 123-194.
- FERNANDES N.F., GUIMARÃES 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*, **33**:163-181.
- GONZALES M. 2000. *Aplicação de métodos de geoprocessamento para o estudo da instabilidade de encostas no município de Teresópolis – RJ*. Dissertação de Mestrado, Depto. de Geologia. UFRJ, Rio de Janeiro, 157p.
- GUERRA A.J.T. & CUNHA S.B. 1994. *Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos* - Bertrand Brasil, Rio de Janeiro, 1994. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 474 p.
- GUERRA A.J.T., SILVA A.S. da, BOTELHO R.G.M. 1999. *Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações*. Bertrand Brasil, 340 p.
- GUIDICINI G. & NIEBLE C.M. 1984. *Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação*. Ed. Edgard Blücher, São Paulo, 194 p.
- GUIMARÃES R.F., MONTGOMERY D.R., GREENBERG H.M., GOMES R.A.T., FERNANDES N.F., CARVALHO Jr. O.A. 2003. Parametrization of soil properties for a model of topographic controls on shallow landsliding: application to Rio de Janeiro. *CATENA*, **69**:99-108.
- LEE S., CHWAE U., MIN K. 2002. Landslide susceptibility mapping by correlation between topographic and geological structure: the Janghung area, Korea. *Geomorphology*, **1153**: in press.
- MONTGOMERY D.R. & DIETRICH W.E. 1994. A Physically Based Model for the Topographic Control on Shallow Landsliding. *Water Resources Research*, **30**:1153-1171.
- PACK R.T., TARBOTON D.G., GOODWIN C.N. 1998a. *A Stability Index Approach to Terrain Stability Hazard Mapping*. SINMAP User's Manual., 68 p.
- PACK R.T., TARBOTON D.G., GOODWIN C.N. 1998b. The SINMAP approach to terrain stability mapping. In: MOORE D.P. & HUNGR O. (eds.), *Proceedings - International Congress of the International Association for Engineering Geology and the Environment* 8, v.2, A. A. Balkema, Rotterdam, Netherlands, pp. 1157-1165.
- TAIOLI F. & CORDANI U.C. 2000. Capítulo 24 – A Terra, a humanidade e o desenvolvimento sustentável. In: *Decifrando a Terra*. Ed. Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 558pp.
- UERJ/IBGE. 1998. *Estudo ambiental como subsídio à metodologia para o ordenamento territorial através de análise de caso: município de Teresópolis - RJ*. Grupo de Estudos Territoriais, Faculdade de Geologia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Diversos Volumes, Rio de Janeiro.
- WP/WLI – UNESCO. 1990. Working Party on World Landslide Inventory - A Suggest Method for Reporting a Landslide. *Bulletin of the IAEG*, **41**:5-12.
- WP/WLI – UNESCO. 1994. *Working Party on World Landslide Inventory – The Multilingual Landslide Glossary*. Bitech Publishers, Richmond, British Columbia, Canadá.