

Utilização do SHALSTAB como ferramenta para o diagnóstico preliminar da suscetibilidade a deslizamentos rasos no baixo vale do rio Luís Alves - SC

Use the SHALSTAB as a tool for preliminary diagnosis of susceptibility to shallow landslides on the low valley of Luis Alves river, Santa Catarina - Brazil

Jéssica Gerente¹(*)
Edna Lindaura Luiz²
Mariane Alves Dal Santo³

Resumo

Movimentos de massa são processos do meio físico muito perigosos e relativamente comuns no vale do rio Itajaí em Santa Catarina. Apesar da frequência e magnitude destes fenômenos na região, mapeamentos para identificação das áreas de maior suscetibilidade a estas ocorrências são escassos, e para algumas regiões, inexistentes. Aplicou-se em uma porção de 10 km² do baixo vale do rio Luís Alves-SC, uma área muito atingida no desastre de 2008, o *Shallow Slope Stability Model* (SHALSTAB) para identificação preliminar dos locais com maiores potencialidades à deflagração de deslizamentos rasos. Como parâmetro topográfico utilizou-se o modelo digital de elevação da NASA, o *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), reamostrado para uma resolução espacial de 30 metros. Para os demais parâmetros de *input* no SHALSTAB, utilizou-se do conhecimento acerca das características dos mantos de alteração do local, assim como de dados de trabalhos realizados na região. O *raster* gerado como produto da simulação do SHALSTAB foi validado a partir do seu cruzamento com um inventário de cicatrizes de deslizamentos deflagrados em novembro de 2008. Observou-se que 83,33% das cicatrizes mapeadas no inventário localizam-se em áreas que o modelo mostrou ter diferentes graus de instabilidade, o que é um resultado significativo e valida a simulação gerada pelo SHALSTAB.

-
- 1 Acadêmica do curso de Geografia (Bacharelado e Licenciatura) da Universidade do Estado de Santa Catarina -FAED/UDESC; Bolsista de iniciação científica, vinculada ao Laboratório de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto (GEOLAB); Endereço: Avenida Madre Benvenuta, 2007, FAED, GEOLAB, CEP: 88035-001, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil; E-mail: jessicagerente@gmail.com (*) Autora para correspondência.
 - 2 Dra.; Geógrafa; Professora Adjunta do Departamento de Geografia da Universidade Estadual de Santa Catarina, UDESC; Endereço: Aveinha Madre Benvenuta, 2007, FAED, LGEM, CEP: 88035-001, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil; E-mail: elinluz@uol.com.br.
 - 3 Dra.; Geógrafa; Professora Associada do Departamento de Geografia e do Programa de Mestrado Profissional em Planejamento Territorial e Desenvolvimento Socioambiental (MPPT) da Universidade Estadual de Santa Catarina, UDESC; Endereço: Avenida Madre Benvenuta, 2007, FAED, GEOLAB, CEP: 88035-001, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil; E-mail: marianedalsanto@udesc.br.

Recebido para publicação em 20/12/2013 e aceito em 05/04/2014

Ambiência Guarapuava (PR) v.10 Suplemento I p. 333 - 350 Ago. 2014 ISSN 1808 - 0251
DOI:10.5935/ambiencia.2014.supl.08

Devido à baixa resolução espacial do MDE utilizado, assim como insuficiente precisão em relação aos valores reais de altimetria, considerou-se a simulação realizada como satisfatória para fins de delimitação remota e preliminar das porções do relevo mais perigosas ao uso e ocupação humana. A partir destes resultados, é possível realizar estudos mais detalhados nas porções do relevo indicadas como suscetíveis pelo modelo.

Palavras-chave: Modelagem; movimentos de massa; previsão.

Abstract

Mass movements are the most dangerous physical environment processes and relatively common in the Itajaí Valley, Santa Catarina, Brazil. Despite the frequency and magnitude of these phenomena in the region, mapping to identify the most susceptible areas to these occurrences are rare and to some counties, nonexistent. It was used the Shallow Stability Model (SHALSTAB), in a ten squared kilometers portion of the low valley of Luís Alves river, the most affected area by the disasters of 2008, for a preliminary identification of areas with the greatest tendency to the deflagration of shallow landslides. As parameter topographic, it was used the Digital Elevation Model (DEM) of NASA, the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) corrected for spatial resolution of 30 meters. For other input parameters in SHALSTAB, it was applied the knowledge about the local soils characteristics as well as data from studies conducted in the region. The raster generated as the product of the SHALSTAB simulation was validated by an inventory of landslides scars initiated in November 2008. It was observed that 83.33% of the scars mapped in inventory are located in areas where the model showed to have varying degrees of instability, which is a significant result and validates simulation generation by SHALSTAB. Due to the low spatial resolution of the DEM used as well as its poor accuracy compared to real values of altimetry, we considered the simulation performed as satisfactory for the purposes of remote and preliminary delimitation of the most dangerous portions of the relief to human use and occupation. Based on the results, it is possible to carry out more detailed studies on the portions of the relief susceptible indicated as susceptible by the model.

Key words: Modeling; mass movements; prediction.

Introdução

Os movimentos de massa são processos geomorfológicos que possuem a atuação da força gravitacional como agente, não havendo para a ocorrência destes a participação direta de outros agentes como chuva, vento ou mar (CROZIER, 1986). Os movimentos de massa caracterizam-se basicamente pela transferência de rochas, regolito ou solo encosta abaixo, buscando energia potencial menor.

Os diversos tipos de movimentos de massa revelam diferentes mecanismos de ruptura e também fatores condicionantes. Em razão da complexidade geométrica, do tipo de superfície de ruptura, do material envolvido no movimento, entre outras características inerentes a estes processos, não há um consenso único quanto às

classificações, as quais irão variar de acordo com o entendimento de cada autor.

Segundo Selby (1993), os principais critérios adotados para a tipologia dos movimentos de massa relacionam-se com as características da cicatriz e do material removido, a saber: o tipo de matéria transportada, a sua morfologia, a forma de deformação ou de ruptura, os mecanismos, a velocidade do movimento, a quantidade de água envolvida, entre outros.

A classificação utilizada pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT), a qual se baseia no trabalho de Augusto Filho (1992), considera para a tipologia de um movimento de massa a geometria do movimento, a existência ou não de superfície de ruptura definida, o tipo do material transportado e a velocidade do movimento (Quadro 1).

Quadro 1 - Classificação dos movimentos de massa

PROCESSO	CARACTERÍSTICAS DOS MOVIMENTOS DE MASSA/MATERIAL/GEOMETRIA
Rastejos (<i>creep</i>)	-vários planos de deslocamento (internos) -velocidades muito baixas (cm/ano) a baixas e decrescentes com a profundidade -movimentos constantes, sazonais e intermitentes -solo, depósitos, rocha alterada, fraturada -geometria definida
Escorregamentos (<i>slides</i>)	-poucos planos de deslocamento (externos) -velocidades médias (m/h) a altas (m/s) -pequenos a grandes volumes de material -geometria e materiais variáveis: - Planares ou translacionais: solos pouco espessos, solos e rochas com um plano de fraqueza - Circulares ou rotacionais: solos espessos homogêneos e rochas muito fraturadas - Em cunha: solos e rochas com dois planos de fraqueza
Quedas (<i>Falls</i>)	-sem planos de deslocamento -movimentos tipo queda livre ou em plano inclinado -velocidades muito altas (vários m/s) -material rochoso -pequenos e médios volumes -geometria variável: lascas, placas, blocos, etc. - Rolamento de matacão -Tombamento
Corridas (<i>Flows</i>)	-muitas superfícies de deslocamentos (internas e externas à massa de movimentação) -movimento semelhante ao de um líquido viscoso -desenvolvimento ao longo das drenagens -velocidades médias a altas -mobilização de solo, rocha, detritos e água -grandes volumes de material -extenso raio de alcance, mesmo em áreas planas.

Fonte: Augusto Filho, 1992 apud BRASIL (2007).

Conforme as condições ambientais, determinados tipos de movimentos de massa são mais comuns. Em áreas de rochas pouco alteradas, a presença de fraturas é um condicionante muito importante para a deflagração de movimento de massa, pois há individualização de fragmentos rochosos. Nos locais com esta característica, as ocorrências mais prováveis são quedas, tombamentos e rolamentos de blocos rochosos.

Em morros ou colinas suaves, declividade menos acentuada e mantos de intemperismo espessos e homogêneos, os movimentos de massa mais prováveis serão os do tipo deslizamento rotacional. Este tipo de movimento de massa geralmente ocorre junto à base da encosta e apresenta superfície de ruptura côncava.

Em encostas íngremes de morros e montanhas com manto de alteração pouco desenvolvido, os movimentos de massa do tipo deslizamentos rasos ou translacionais ocorrem com mais frequência, além de corridas de detritos. Nestes locais, há existência de solos rasos, devido à topografia mais acentuada, e com diferentes camadas em razão de variações de textura, estrutura e permeabilidade. Estas variações criam descontinuidades hidráulicas que condicionam a retenção e/ou a circulação da água que infiltra durante as chuvas.

Nas encostas montanhosas ou de morrarias, superfícies de ruptura podem ser geradas especificamente no contato solo/rocha, onde a descontinuidade hidráulica é mais acentuada. Desta forma, são deflagrados deslizamentos rasos. Neste contato solo/rocha é possível ocorrer acumulação de água, haja vista que ela é impossibilitada de continuar a infiltrar devido à pequena condutividade hidráulica das rochas. Contudo, alguns autores como Wolle e Carvalho (1989),

colocam que apenas o aumento da quantidade de água dentro dos poros do solo, diminuindo a sucção e, por conseguinte, a coesão aparente, já é capaz de promover a ruptura dos materiais constituintes da encosta.

Os materiais rompidos das encostas a partir de deslizamentos translacionais podem permanecer no estado semissólido, com queda de resistência apenas ao longo da superfície de ruptura ou podem se apresentar completamente deformados, no estado líquido, o que demonstraria uma perda generalizada da resistência destes materiais.

Quando os materiais deslizados estão já no estado fluido ou quando entram em um talvegue ao longo de seu trajeto encosta abaixo, ganhando água neste processo, podem se transformar em corridas de detritos. As corridas apresentam grande velocidade de deslocamento e grande poder erosivo por onde passam. Elas necessitam de encostas mais longas para ocorrer e, por isso, são processos típicos de ambientes montanhosos ou de morrarias.

Os fatores que podem fazer com que o teor de água aumente em determinados setores dos mantos de alteração das encostas são determinantes na suscetibilidade a movimentos de massa. A topografia é um significativo fator condicionante para a convergência ou divergência de fluxo ao longo das encostas, tanto na sua superfície quanto dentro dos mantos de alteração/solos que a compõem.

Os métodos mais precisos para diagnosticar a suscetibilidade de um local a movimentos de massa pautam-se em estudos minuciosos e *in loco*, o que demanda tempo, dinheiro, equipe de profissionais especializados, entre outros aspectos que, na realidade da maioria dos municípios brasileiros, acabam inviabilizando este tipo de

pesquisa para fins de zoneamento de riscos e planejamento territorial.

A modelagem matemática de previsão a movimentos de massa aparece como uma das alternativas mais eficientes e com menor necessidade de grandes investimentos para a obtenção do conhecimento das porções da paisagem mais perigosas à ocupação humana. Em se tratando de deslizamentos rasos, o modelo de previsão SHALSTAB – *Shallow Slope Stability Model* (DIETRICH; MONTGOMERY, 1994), vem sendo bastante utilizado por pesquisadores brasileiros (GUIMARÃES et al., 1999; FERNANDES et al., 2001; RAMOS et al., 2002; GOMES et al., 2004; ZAIDAN; FERNANDES, 2009; MICHEL et al., 2011; entre outros). Ele tem como um importante parâmetro de análise, o comportamento topográfico da área estudada.

Dada à escassez de trabalhos na região do vale do Itajaí, mais especificamente no baixo vale do rio Luís Alves, relacionados ao mapeamento das porções do relevo com maior suscetibilidade a movimentos de massa do tipo deslizamentos rasos, realizou-se um estudo preliminar com este objetivo através da aplicação do modelo SHALSTAB.

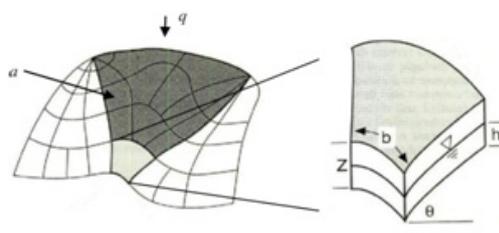
Modelo SHALSTAB

O SHALSTAB (DIETRICH; MONTGOMERY, 1994), é um modelo matemático determinístico fisicamente baseado que associa dados topográficos extraídos de um Modelo Digital de Elevação (MDE) a equações derivadas da combinação entre o modelo hidrológico de estado uniforme - *Steady State* (BEVEN; KIRKBY, 1979; O'LOUGHLIN, 1986) e o de estabilidade de encostas baseado na equação

do talude infinito de Mohr-Coulomb (GUIMARÃES et al., 2008).

O modelo hidrológico objetiva simular a variabilidade espacial da altura da coluna d'água dos mantos de alteração na bacia, assumindo para isto uma quantidade de recarga de chuva uniforme. Ele admite que o padrão de saturação em um determinado ponto a jusante está relacionado com a quantidade de fluxo proveniente de sua área de contribuição em razão da declividade (θ) da encosta (GUIMARÃES et al., 2003). Em ambiente computacional, este ponto para o qual a drenagem da área de contribuição (a) irá convergir, é representado pela unidade de contorno de um *pixel* (b) podendo ser mais bem entendido pela figura 1:

Figura 1 - Elementos do modelo *Steady State*



Fonte: Adaptado de Montgomery e Dietrich (1994).

Em um Sistema de Informações Geográficas (SIG), o SHALSTAB gera um índice expresso em logaritmo que atribui para cada célula da matriz de saída um intervalo de valor referente à razão da chuva crítica com a transmissividade do solo (q/T) (FERNANDES et al., 2001). Na versão original do modelo, cada *pixel* do MDE de entrada é reclassificado em até sete classes, as quais irão representar desde porções cronicamente instáveis do relevo a porções estáveis. Quanto maior o valor do $\log q/T$, maior será o grau de instabilidade da encosta. Quando se tem o valor de transmissividade

do solo (T), o SHALSTAB também é capaz de presumir a quantidade de chuva crítica (q) necessária para deflagração de um deslizamento raso. A equação que este modelo executa, a fim de definir graus de instabilidade e estabilidade das encostas, pode ser escrita em função do $\log q/T$ pela seguinte fórmula:

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

Onde:

(a/b) = Área drenada a montante por comprimento de contorno unitário;

θ = Inclinação da encosta;

ρ_s = Densidade do solo;

z = Espessura do manto de alteração;

ϕ = Ângulo de atrito interno;

C' = Coesão do solo;

ρ_w = Densidade específica da água;

g = Aceleração da gravidade.

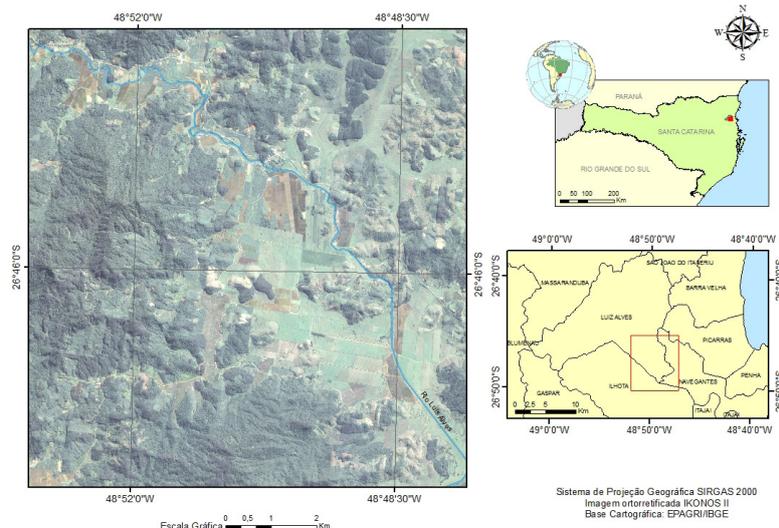
Os termos entre colchetes derivam da equação do modelo de estabilidade de encosta (talude infinito), os demais provêm do modelo hidrológico de estado uniforme associado a

princípios da lei de Darcy. As variáveis de área de contribuição por comprimento de contorno unitário e de inclinação são extraídas do modelo digital de elevação. A densidade específica da água e a aceleração da gravidade são valores constantes. Os demais parâmetros referem-se às características do manto de alteração da área de estudo, sendo inseridos preferencialmente com base em dados primários coletados em campo ou em dados secundários.

Características da área de estudo e o desastre de 2008

A área de estudo compreende um trecho do baixo vale do rio Luís Alves, afluente do rio Itajaí-Açu, que engloba principalmente o município de Luís Alves, mas também partes dos municípios de Navegantes, Ilhota e Piçarras, todos no estado de Santa Catarina. Ela corresponde a uma cena de imagem do satélite IKONOS II, com coordenadas $26^{\circ}43'31''$ e $26^{\circ}48'19''$ latitude Sul e $48^{\circ}53'5''$ e $48^{\circ}48'43''$ Oeste (Figura 2).

Figura 2 - Localização da área de estudo



Fonte: Autoras (2013).

A paisagem é constituída por uma ampla planície presente no baixo vale do rio Luís Alves e por um conjunto de elevações cristalinas muito dissecadas pela densa rede de drenagem. As elevações ocorrem na forma de morros e montanhas, com pequena expressão de colinas, sendo que estas últimas estão localizadas principalmente junto ao rio Luís Alves. Os morros e montanhas apresentam topos convexos e, algumas vezes, na forma de cristas. Muitas encostas destas elevações possuem patamares e anfiteatros nelas inscritos (Figura 3).

Os vales dos afluentes são mais encaixados a montante, com abertura de

planícies alveolares. Muitos cursos d'água seguem lineamentos estruturais. O rio Luís Alves apresenta padrão de canal meandrante, porém já sofreu retificação em grande parte de seu baixo curso.

Os terrenos da área de estudo são constituídos por rochas do Complexo Granulítico de Santa Catarina, composto de rochas do tipo enderbito e gnaisses (FORNARI, 1998), além de diques quartzo-feldspáticos de expressiva espessura. A região é cortada por diferentes lineamentos de eventos e idades diferentes, resultando também em rochas retrabalhadas por metamorfismo de atrito, como milonitos.

Figura 3 - Paisagem da área de estudo (município de Luís Alves/SC)



Fonte: Mariane Alves Dal Santo (2010).

Nota: Observar elevação na forma de morro com encosta com diferentes setores de declividade. Na encosta, notar a presença de pequena bacia suspensa.

O clima da região é subtropical úmido do tipo Cfa, segundo Köepen. As médias de temperaturas variam entre 26 °C, no verão, e 17,3 °C no inverno (PREFEITURA MUNICIPAL DE LUÍS ALVES, 2011). As chuvas são distribuídas ao longo de todas as estações do ano, com pequena diminuição de quantidade durante o inverno. Segundo Monteiro (2001), atuam na região diferentes sistemas meteorológicos, como as frentes frias, os vórtices ciclônicos, os cavados de

níveis médios, a convecção tropical e a ZCAS (Zona de Convergência do Atlântico Sul). Estes sistemas são responsáveis pelas chuvas presentes o ano todo na área de estudo, produzindo um total anual de 1.415,5 mm (PREFEITURA MUNICIPAL DE LUÍS ALVES, 2011).

O clima úmido e as rochas com minerais suscetíveis ao intemperismo presentes na área de estudo produzem um manto de intemperismo significativo, onde

são desenvolvidos solos do tipo Argissolos e Cambissolos. Estes solos são encontrados nas elevações cristalinas, enquanto nas planícies fluviais são desenvolvidos solos do tipo Neossolos flúvicos, Cambissolos e Gleissolos, os quais são derivados em sua maior parte de depósitos de sedimentos.

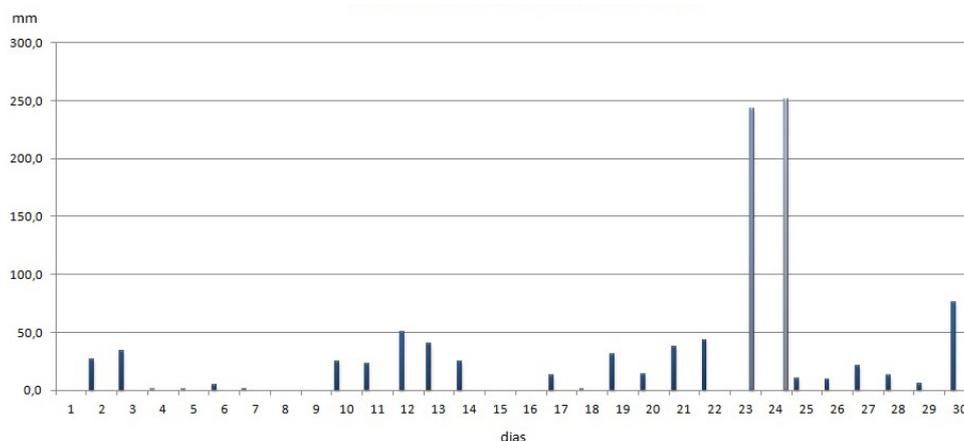
A região apresenta cobertura vegetal de mata atlântica primária e em diferentes estágios de regeneração nas encostas dos morros e montanhas, sendo substituída em algumas partes, especialmente no sopé das elevações, por plantações de banana e reflorestamento. Nas planícies, a vegetação “nativa” já foi muito alterada e a maior parte do uso da terra é composto por pastagens e por cultivo de palmeiras e arroz.

As planícies do médio e baixo vale dos afluentes maiores e do rio Luís Alves receberam sedimentos de granulometria mais fina (areia, silte e argila) produzidos

pelos movimentos de massa que ocorreram no desastre de 2008, enquanto nas planícies alveolares dos altos e médios vales foram armazenados muitos sedimentos de granulometria grossa, com presença de blocos, calhaus, cascalhos (SERRANO, 2011). Esta sedimentação, segundo Serrano (2011) inviabilizou as atividades econômicas desenvolvidas nas planícies.

As chuvas atípicas que ocorreram no mês de novembro de 2008 já haviam sido precedidas por chuvas continuadas desde o mês de setembro. Neste episódio de novembro de 2008, a intensa precipitação, sobretudo nos dias 23 e 24, deflagrou nos municípios do vale do rio Itajaí-Açu inundações nos fundos de vale e movimentos de massa nas encostas cristalinas. Apesar do pico maior de chuva (cerca de 250 mm/dia) ter ocorrido nestes dois dias, já estava chovendo continuamente desde o dia 19, como indica o gráfico 1.

Gráfico 1 - Chuvas diárias durante o mês de novembro de 2008 na região do vale do Itajaí -SC



Fonte: Estação pluviométrica de Blumenau-SC - Agência Nacional de Águas (ANA).

Estas chuvas intensas provocaram diferentes tipos de movimentos de massa nas encostas da área de estudo com consequências muito desastrosas, como o soterramento de residências, de

equipamentos públicos, de plantações. Além destas consequências, os movimentos de massa também produziram mudanças nas formas das encostas e assoreamento dos fundos de vale.

Os processos gravitacionais do tipo corridas de detritos e deslizamentos se mostraram como os fenômenos mais perigosos à população porque não causaram

perdas e danos apenas nas áreas onde ocorreram as rupturas, mas também nas zonas de passagem e de deposição dos sedimentos (Figuras 4 e 5).

Figuras 4 e 5 - Fotografias aéreas oblíquas das cicatrizes e depósitos de movimentos de massa na região do vale do rio Itajaí-Açu em novembro de 2008



Fonte: Santa Catarina (2009).

Nota: Observar a grande extensão da área afetada pelo fenômeno e a grande quantidade de material mobilizado.

Materiais e Métodos

Em ambiente SIG utilizou-se a versão original do SHALSTAB, que é disponibilizada *online* pelo *site* da Universidade da Califórnia em Berkeley/USA e é executada como uma extensão do *software* ArcView 3.x[®]. Não há uma versão oficial deste modelo que seja compatível com

as versões mais atuais do sistema ArcGIS. A simulação foi realizada com o módulo que considera os valores de coesão do solo, o SHALSTABco.

Como dado matricial de entrada utilizou-se um recorte, referente à área de estudo, do modelo digital de elevação SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) da NASA, corrigido e reamostrado para uma resolução

espacial de trinta metros pela EPAGRI (Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina). Apesar da pouca precisão e resolução espacial deste dado, parâmetros que influenciam diretamente na qualidade do resultado (FERNANDES et al., 2004), optou-se pela utilização deste produto pelo fato de ser um dos únicos anteriores ao desastre de 2008 com disponibilidade gratuita e fácil acesso.

A calibração do modelo foi realizada através de consultas em diferentes trabalhos e pelo conhecimento empírico das características do manto de alteração da região, estimando-se então os melhores valores de entrada. Sabe-se que determinadas características dos materiais do manto de alteração variam bastante de lugar para lugar, e inclusive em diferentes pontos da mesma encosta, porém como o objetivo do trabalho voltou-se mais para a avaliação do potencial do SHALSTAB como ferramenta de auxílio ao zoneamento preliminar das áreas mais instáveis do relevo, optou-se pela utilização de dados secundários.

Para os parâmetros de densidade aparente e coesão do solo, foram utilizados os dados gerados por Luiz (2003) em análise do horizonte C de um manto de alteração de rochas granitóides alcalinas do município de São Pedro de Alcântara - SC. O valor do ângulo de atrito interno foi obtido de dados medidos nos trabalhos de Volker (2012), Michel et al. (2011) e Luiz (2003), os quais foram realizados em regiões do estado de Santa Catarina cujo manto de alteração deriva de rochas cristalinas. Por fim, o valor de profundidade inserido no SHALSTAB foi baseado no trabalho de Michel et al. (2011) e também no conhecimento de campo relativo à espessura do regolito da região. Desta forma, para o ângulo de atrito interno (ϕ) utilizou-se o valor de 31°, para

a densidade do solo (ρ_s) 1200 kg/m³, para a espessura do solo (z) 10 m e para a coesão do solo (C') 15000 n/m².

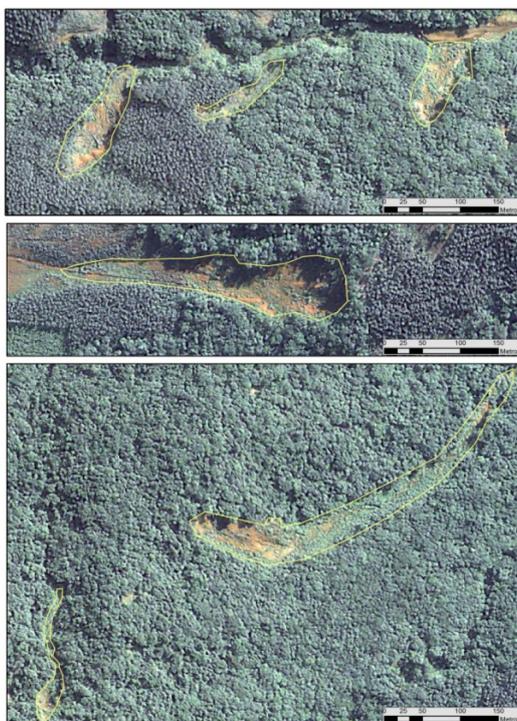
Para validar o produto gerado pela simulação do SHALSTAB realizou-se um inventário das cicatrizes de deslizamentos rasos deflagradas no desastre de novembro de 2008. As feições foram identificadas e mapeadas sobre uma ortoimagem fusionada de alta resolução espacial tomada pelo satélite IKONOS II em julho de 2010, com posterior reambulação.

Os sensores do satélite IKONOS II operam na faixa espectral do visível e no infravermelho próximo, possuindo na banda pancromática uma resolução espacial de um metro e de quatro metros na banda multiespectral. Sua resolução radiométrica é de onze bits, ou seja, 2048 níveis de cinza e sua resolução temporal é de quatorze dias. A característica radiométrica do sensor utilizado possibilita um maior grau de contraste entre os diferentes alvos imageados, facilitando por consequência, a identificação das cicatrizes de movimentos de massa presentes na imagem.

A imagem ortorretificada, utilizada para a vetorização por identificação em tela das feições de cicatrizes de movimentos de massa, possui 10 km² de imageamento e foi avaliada na classe A do Padrão de Exatidão Cartográfica para escala planialtimétrica 1:10.000 (Parreira, 2011).

Pelo fato de muitas vezes as corridas de detritos evoluírem de deslizamentos translacionais quando o material rompido ganha água e com isso mais mobilidade e energia, classificou-se tanto as feições de cicatrizes geradas por deslizamentos translacionais quanto às geradas por corrida de detrito, como cicatrizes de deslizamentos rasos. A morfologia das cicatrizes na ortoimagem serviu de método para a identificação das feições (Figura 6).

Figura 6 - Detalhes das feições mapeadas no inventário das cicatrizes de deslizamentos rasos deflagradas em novembro de 2008 observadas sobre a ortoimagem IKONOS II



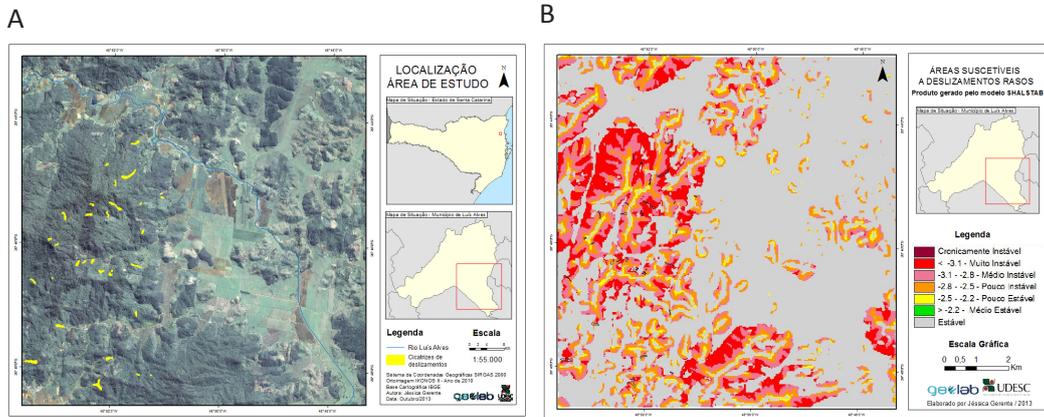
Fonte: Autoras (2013).

O modelo SHALSTAB tem como parâmetro muito importante a variação topográfica da área de estudo, desta forma, optou-se em realizar uma análise da ocorrência de movimentos translacionais com um dos elementos topográficos que é a declividade do terreno. Para isso, foram comparados dois mapas de declividade: Um confeccionado a partir do recorte do SRTM corrigido pela EPAGRI cuja resolução espacial é trinta metros (mesmo MDE de entrada no SHALSTAB); e outro a partir de um MDE de resolução espacial de onze metros, obtido pelo processamento do par estereoscópico das imagens IKONOS II (PARREIRA, 2011).

Resultados e Discussão

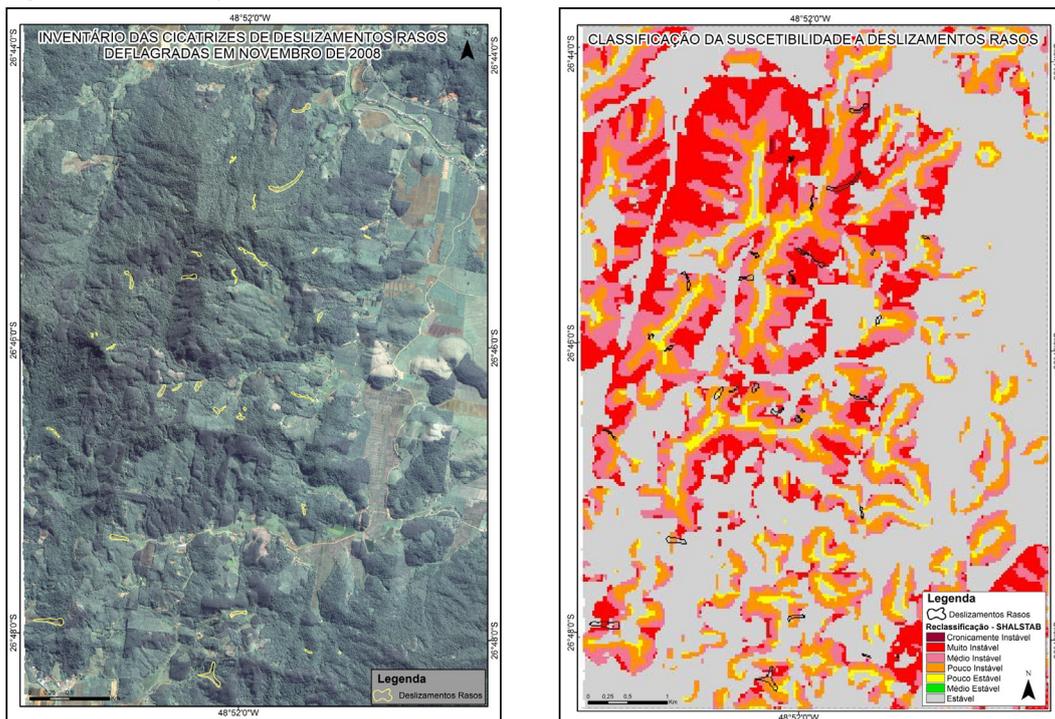
Com o cruzamento entre o inventário de cicatrizes de deslizamentos rasos e o mapa gerado pelo SHALSTAB (Figuras 7 e 8), uma das técnicas utilizadas para a validação das simulações de modelos de previsão, verificou-se que a maior parte das cicatrizes situa-se em mais de uma classe de instabilidade. Isto pode ser explicado pelo fato destas cicatrizes ocuparem longos trechos das encostas e também devido à generalização do MDE de entrada, cujo parâmetro (o único distribuído inserido no SHALSTAB) influencia diretamente na delimitação de cada classe e precisão do resultado.

Figura 7 - A) Mapa de localização da área de estudo e das cicatrizes de deslizamentos rasos no baixo vale do rio Luís Alves-SC. B) Inventário das cicatrizes (contorno em preto) sobreposto à classificação de suscetibilidade do SHALSTAB



Fonte: Autoras (2013).

Figura 8 - Recorte para a área de interesse



Fonte: Autoras (2013).

Nota: A) Inventário das cicatrizes de deslizamentos rasos deflagradas em novembro de 2008 no baixo vale do rio Luís Alves-SC. B) Inventário de cicatrizes de deslizamentos rasos sobreposto à classificação da suscetibilidade simulada pelo SHALSTAB

Considerando que a parte final das cicatrizes mapeadas poderia ser de material coluvial e não a zona de ruptura, que é o que o modelo SHALSTAB indica, utilizou-se somente o terço superior de cada feição presente no inventário para a análise de suscetibilidade. Desta

forma, considerou-se que esta fração da cicatriz representaria a zona de maior probabilidade de o movimento ter sido deflagrado, sendo realizada a partir dela a quantificação das cicatrizes em relação às classes de instabilidade gerada pelo SHALSTAB (Tabela 1).

Tabela 1 - Ocorrências de cicatrizes por áreas de instabilidade

CLASSES – SHALSTAB	QUALIFICAÇÃO	ÁREA (%)	OCORRÊNCIAS DE CICATRIZES
Instabilidade Crônica	Cronicamente Instável	0,01	-
$\log q/T < -3,1$	Muito Instável	8,58	6
$-3,1 < \log q/T < -2,8$	Medianamente Instável	10,70	7
$-2,8 < \log q/T < -2,5$	Pouco Instável	11,23	12
$-2,5 < \log q/T < -2,2$	Pouco Estável	2,47	03
$\log q/T > -2,2$	Medianamente Estável	0,01	-
Estável	Estável	67,00	02

Fonte: Autoras (2013).

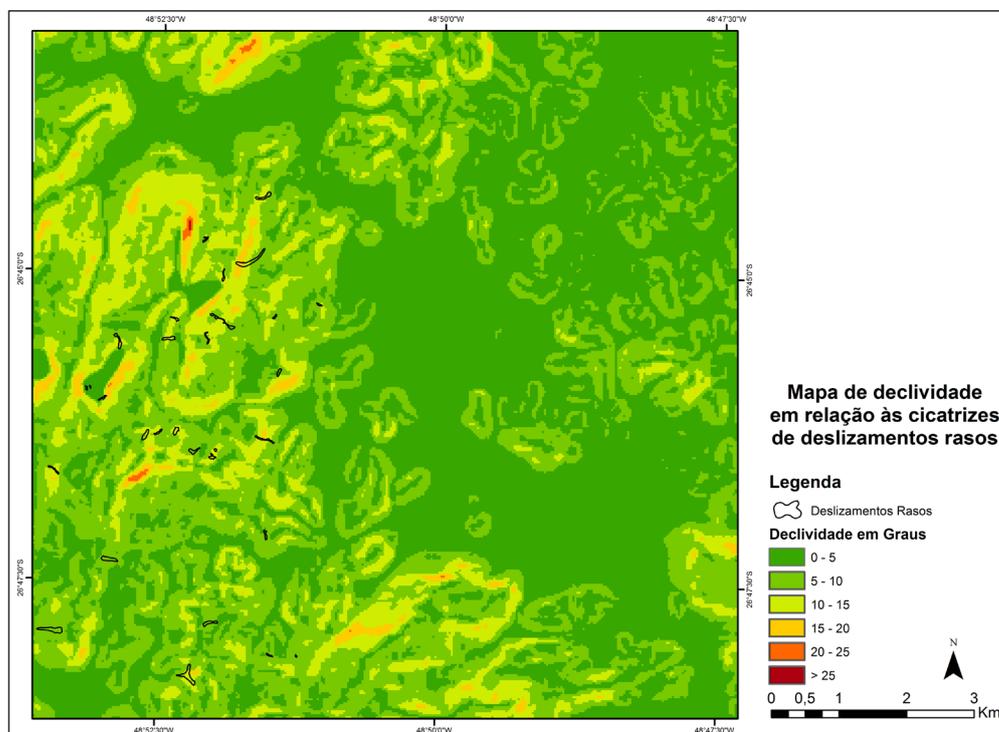
Como o modelo gera um resultado quantitativo, para fins de interpretação as classes foram qualitativamente reclassificadas em diferentes graus de instabilidade e estabilidade. Assim, com base no critério adotado, o qual considera somente o terço superior das cicatrizes, constatou-se que 83,33% delas localizam-se em áreas que possuem diferentes graus de instabilidade e 10% com pouca estabilidade.

Das trinta cicatrizes mapeadas, apenas duas (6,66%) estão em porções consideradas estáveis pelo modelo SHALSTAB, sendo que uma delas encontra-se junto ao topo da elevação, local onde há pequena área de contribuição de água, diminuindo assim o valor da área drenada a montante por comprimento de contorno unitário (a/b). Desta forma, estas ocorrências não estão de acordo com os preceitos do modelo, sendo a pequena resolução espacial do dado topográfico de entrada uma das explicações para este resultado insatisfatório. Outra razão pode estar relacionada ao tipo de mecanismo de ruptura destas duas ocorrências não ter sido o mesmo que o modelo utiliza.

Outra questão que chama atenção na simulação realizada são as áreas consideradas pelo modelo como mais instáveis estarem localizadas na média e baixa encosta, o que é facilmente compreendido, já que estes são os setores que apresentam as maiores áreas de contribuição de água. Contudo, as ocorrências de cicatrizes aparecem no terço superior e médio da encosta, em áreas ainda consideradas instáveis pelo modelo, porém não as mais instáveis. Talvez, a explicação para isto seja a de que as rupturas começaram em setores mais baixos das encostas e por sucessivas rupturas remontantes tenham alcançado porções mais altas na encosta.

A análise da localização das cicatrizes em relação às classes de declividade derivadas do modelo digital de elevação SRTM (Figura 9) e pelo modelo digital de terreno obtido do processamento do par estereoscópico do sensor IKONOS II (Figura 10), mostrou grandes diferenças, o que já era esperado pelo fato de suas resoluções espaciais em métodos de geração serem também muito diferentes.

Figura 9 - Mapa de declividade da área de estudo obtido a partir do modelo digital de elevação SRTM



Fonte: Autoras (2013).

Analisando o mapa de declividade baseado no SRTM, verificou-se que a maior parte das cicatrizes mapeadas encontra-se em porções da encosta consideradas de menor declividade, até quinze graus (Tabela 2).

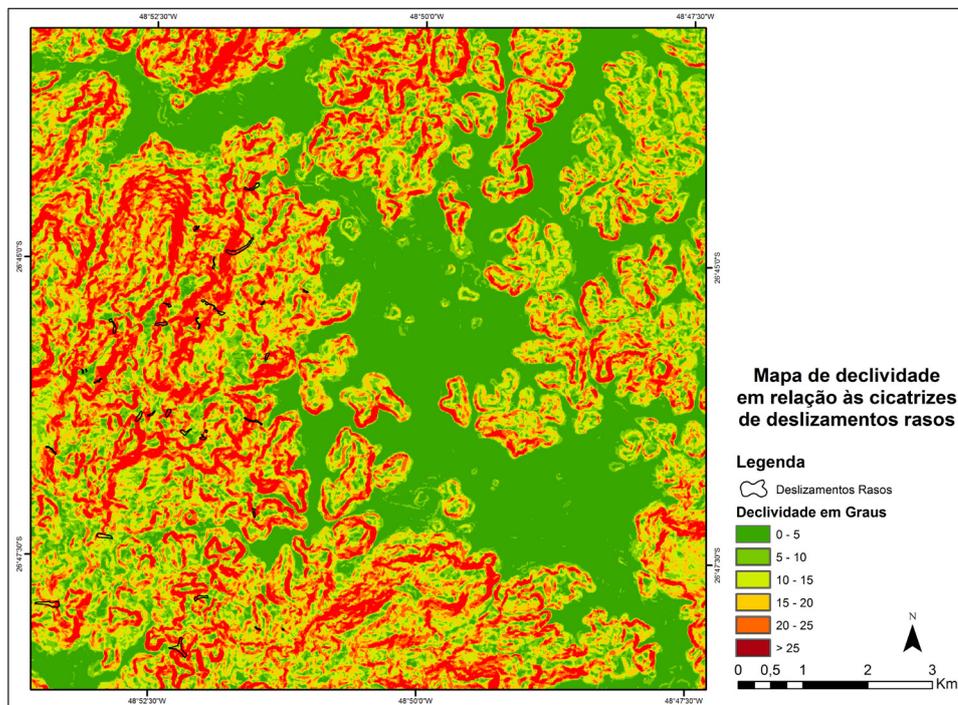
Tabela 2 - Quantificação das ocorrências de deslizamentos rasos em relação aos graus de declividade derivados do modelo SRTM

SRTM	
Declividade em Graus	Número de Cicatrizes
0 – 5	02
5 – 10	12
10 – 15	14
15 – 20	02
20 – 25	-
> 25	-

Fonte: Autoras (2013).

Contudo, deve-se ressaltar que o MDE utilizado para esta análise deriva de um ajuste do SRTM (resolução espacial original de noventa metros), apresentando assim, precisão insuficiente para análises somente a partir dele. Nota-se também uma significativa subestimação dos valores altimétricos expressos pelo SRTM em relação aos valores medidos em campo.

Figura 10 - Mapa de declividade obtido a partir do modelo digital de elevação derivado do processamento de um par estereoscópico de imagens IKONOS II



Fonte: Autoras (2013).

A partir do modelo digital de elevação gerado pelas imagens IKONOS II pode-se observar que as classes com maior declividade são mais expressivas do que o mapa gerado

pelo SRTM (Tabela 3). As inclinações mais acentuadas encontram-se próximas aos topos. Também há topos na forma de cristas, as quais possuem grande declividade.

Tabela 3 - Quantificação das ocorrências de deslizamentos rasos em relação aos graus de declividade derivados do processamento de um par estereoscópico IKONOS II

MDE GERADO EM LABORATÓRIO	
Declividade em Graus	Número de Cicatrizes
0 – 5	-
5 – 10	03
10 – 15	01
15 – 20	02
20 – 25	06
> 25	18

Fonte: Autoras (2013).

Em análise deste segundo mapa de declividade, nota-se que as ocorrências de movimentos de massa são agora mais numerosas nas inclinações acima de 25 graus.

Entre cinco e vinte graus de declividade, são poucas as ocorrências. Infelizmente, este dado mais preciso de declividade não pode ser utilizado como entrada na simulação do

SHALSTAB pelo fato de ter sido obtido de um par estereoscópico IKONOS II com data posterior ao desastre de 2008.

Deve-se ressaltar que a declividade não é o único fator condicionante para a deflagração de deslizamentos translacionais, a forma da encosta também é um parâmetro topográfico muito importante e como a água é o que provoca a maioria das rupturas em clima úmido, as ocorrências mapeadas podem ter relação com encostas de formas mais côncavas, pois elas concentram água. Paisani e Oliveira (1999) encontraram a partir de medidas de campo em uma cabeceira de drenagem côncava, no município de Palmeira, Paraná, que a geração de poro-pressões positivas medida no instrumento mais profundo instalado ocorria somente após o evento chuvoso e que os instrumentos mais superficiais não respondiam a este mesmo evento. Isto significa que a recarga para o aumento das poro-pressões era proveniente da área de contribuição a montante e não da frente de infiltração vertical. Este fenômeno demonstra a importância da forma da encosta para a convergência ou divergência de fluxo.

Conclusões

O desastre de novembro de 2008 provocou muitos movimentos de massa do tipo deslizamento translacional e corridas de detrito. A área de estudo deste trabalho foi

muito afetada por estes fenômenos, os quais ocasionaram grandes perdas e danos não apenas nos locais de ruptura como também nas áreas de passagem dos detritos e de sua deposição. A simulação de áreas suscetíveis a deslizamentos rasos a partir do modelo SHALSTAB mostrou que existem muitas áreas perigosas no baixo vale do rio Luís Alves, com diferentes graus de instabilidade.

Visto a baixa qualidade do MDE utilizado na entrada do modelo, observou-se um bom índice de acerto do SHALSTAB quanto à previsão dos lugares que poderiam ocorrer deslizamentos e os que de fato ocorreram. Apesar de sua pequena resolução espacial, o modelo SRTM corrigido pela EPAGRI mostrou-se apto para uma utilização com fins de reconhecimento inicial (e sem custos), das porções da área de estudo que podem apresentar os maiores perigos à ocupação.

Agradecimentos

À Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina (FAPESC) pela concessão de bolsas e financiamento do projeto de pesquisa: “Diagnóstico de risco geoambiental com uso de sensores orbitais e determinação de cenários suscetíveis” através da chamada pública “Prevenção de Catástrofes Naturais” de 2009.

Referências

AUGUSTO FILHO, O. Caracterização geológico-geotécnica voltada à estabilização de encostas: uma proposta metodológica. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS, 1992. Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro : ABMS/ABGE, 1992. p.721-733.

BRASIL. Ministério das Cidades / Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT. **Mapeamento de risco em encostas e margens de rios**. CARVALHO, C. S.; MACEDO, E. S.; OGURA, A. T.(Org.). Brasília: [S.I] 2007.

CROZIER, M. J. **Landslide**: causes, consequences & environment. Sidney: Crom Helm Ltd., 1986.

DAL SANTO, M. A. **Paisagem da área de estudo (município de Luís Alves/SC)**. 2010. 1 fotografia, color., 6 cm x 5 cm.

ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE. ESRI. ArcView®. Version 3.x. Redlands, Califórnia: ESRI Press, 1999. 1 CD-ROM.

FERNANDES, N. F.; GUIMARÃES, R. F.; GOMES, R. A. T.; VIEIRA, B. C.; MONTGOMERY, D. R.; GREENBERG, H. Condicionantes Geomorfológicos dos deslizamentos nas encostas: avaliação de metodologias e aplicação de modelo de previsão de áreas susceptíveis. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.2, n.1, p.51 – 71, 2001.

_____. Topographic controls of landslide in Rio de Janeiro: Field evidences and modeling. **Catena**, v.55, p.163–181, 2004.

FORNARI, A. **Geologia e metalogênese da porção meridional do Cráton Luís Alves – SC**. 1998. 136 f. Tese (Doutorado em Geociências) – Universidade de Campinas, UNICAMP, Campinas, 1998.

GOMES, R. A. T.; GUIMARÃES, R. F.; CARVALHO JÚNIOR, O. A.; FERNANDES, N. F. Análise da influência da escala cartográfica no resultado de um modelo de previsão de áreas críticas a deslizamentos. **Ciência e Natura**, p.269-286, 2004.

GUIMARÃES, R. F.; MONTGOMERY, D. R.; GREENBERG, H. M.; GOMES, R. A. T. E.; FERNANDES, N. F. Aplicação do Modelo SHALSTAB para a determinação de áreas de risco a escorregamentos rasos em regimes tropicais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 9., São Pedro, **Anais...** São Paulo: 1999. 1 CD-ROM.

GUIMARÃES, R. F.; CARVALHO JUNIOR, O. A.; GOMES, R. A. T.; FERNANDES, N. F. Movimentos de Massa. In: FLORENZANO, Teresa G. (Org.). **Geomorfologia**: conceitos e tecnologias atuais. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. cap. 6, p.159-184.

IKONOS II. Imagem de satélite. [S.I.], 2010. Faixa espectral do visível e no infravermelho próximo, 1 banda pancromática, Resolução 1m, 4 bandas multiespectral.

LUÍS ALVES. Prefeitura Municipal. **Sítio Eletrônico Oficial**. Disponível em: <<http://www.luisalves.sc.gov.br/conteudo/?item=27773&fa=11106>>. Acesso em: 20 nov. 2013.

LUIZ, E. L. **Influência da dinâmica hidrológica e das características das formações superficiais nos mecanismos de ruptura das encostas com rochas granitoides de áreas subtropicais – São Pedro de Alcântara**. 2003. 238f. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Rio de Janeiro, 2003.

MICHEL, G. P.; GOERL, R. F.; KOBAYAMA, M.; HIGASHI, R. A. R. Estimativa da

- quantidade de chuva necessária para deflagrar deslizamentos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 19., 2011, Maceió. **Anais...** Maceió: ABRH, 2011. 20p.
- MONTEIRO, M. A. Caracterização climática do estado de Santa Catarina: uma abordagem dos principais sistemas atmosféricos que atuam durante o ano. **Revista Geosul**, Florianópolis, v. 16, n. 31, p.69-78, 2001.
- MONTGOMERY, D. R.; DIETRICH, W. E. A physically based model for the topographic control on shallow landsliding. **Water Resources Research**, v.30, p.1153-1171, 1994.
- PAISANI, J. C.; OLIVEIRA, M. A. T. Dinâmica da área de contribuição para a formação de escoamento superficial saturado – cabeceira de drenagem da colônia Quero-Quero – Palmeira (PR). **Revista Geociências**, São Paulo, v.18, n.2, p. 261-284, 1999.
- PARREIRA, S. F. **Utilização das imagens IKONOS para a derivação de produtos cartográficos como apoio à gestão de risco a movimento de massa**. 2011. 127 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Planejamento Territorial e Desenvolvimento Socioambiental) – Centro de Ciências Humanas e da Educação, Universidade do Estado de Santa Catarina, UDESC, Florianópolis, 2011.
- RAMOS, V. M.; GUIMARÃES, R. F.; REDIVO, A. L.; GOMES, R. A. T.; FERNANDES, N. F.; CARVALHO JÚNIOR, O. A. Aplicação do modelo SHALSTAB, em ambiente ArcView, para o mapeamento de áreas susceptíveis a escorregamento raso na região do Quadrilátero Ferrífero (MG). **Espaço & Geografia**, Brasília, v.5, n. 1, p. 49-67, 2002.
- SANTA CATARINA. Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina. **Relatório sobre o levantamento dos deslizamentos ocasionados pelas chuvas de novembro de 2008 no complexo do morro do baú, municípios de Ilhota, Gaspar e Luís Alves** - EPAGRI, 2009.
- SANTOS, E. V. dos. **Suscetibilidade a movimentos de massa na microbacia do Ribeirão Máximo, município de Luís Alves, SC**. 2012. 104 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Planejamento Territorial e Desenvolvimento Socioambiental) - Centro de Ciências Humanas e da Educação, Universidade do Estado de Santa Catarina, UDESC, Florianópolis, 2012.
- SELBY, M. J. **Hillslope Materials & Processes**. New York: Oxford University Press, 1993.
- SERRANO, I. G. **Modificações impostas às atividades agropecuárias pelo desastre de 2008, nas planícies do Ribeirão Sorocaba, Luís Alves - SC**. 2011. 56f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geografia) - Centro de Ciências da Educação, Universidade do Estado de Santa Catarina, UDESC, Florianópolis, 2011.
- WOLLE, C. M.; CARVALHO, C. S. Deslizamentos em encostas na Serra do Mar Brasil. **Revista Solos e Rochas**, v. 12, n. único, p. 27-36, 1989.
- ZAIN DAN, R. T.; FERNANDES, N. F. Zoneamento de susceptibilidade a escorregamentos em encostas aplicado à bacia de drenagem urbana do Córrego da Independência - Juiz de Fora (MG). **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.10, n.2, p.57-76, 2009.