ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: www.ufpe.br/rbgfe

Identificação de Cicatrizes de Movimentos de Massa na Borda Oriental da Bacia do Paraná com Base em Imagens Landsat 5-TM

Mariana Madruga de Brito¹

¹Engenheira Ambiental. Mestre em Engenharia Civil. Doutoranda em Geografia. Department of Hydrology and Water Resources Management, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Meckenheimer Allee, 172, 53115, Bonn, Germany. Phone: +49(0)22873-6544. E-mail para correspondência: mmdb@outlook.com.

Artigo recebido em 19/06/2014 e aceito em 26/03/2015

RESUMO

Movimentos de massa são fenômenos naturais caracterizados pelo deslocamento de solo e rocha vertente abaixo. Quando esses processos ocorrem em áreas urbanizadas, podem causar perdas econômicas, impactos sociais e, em casos extremos, perda de vidas humanas. Na tentativa de mitigar tais desastres, torna-se necessário mapear os locais já afetados pelos mesmos, uma vez que escorregamentos recentes podem sugerir futuros padrões de instabilidade. Nesse sentido, este trabalho teve por objetivo mapear as cicatrizes de movimentos de massa em um segmento da Borda Oriental da Bacia do Paraná, por meio do processamento de uma imagem Landsat 5-TM, órbita/ponto 220/80, data de passagem 28/08/2009. Para facilitar a discriminação destas feições, elaboraram-se composições coloridas RGB e processamentos tais como Ampliação Linear de Contraste (ALC), razão entre bandas e Análise por Componentes Principais (PCA). A fim de validar o inventário elaborado, utilizaram-se imagens de alta resolução disponíveis no *software* Google Earth®. Ao total, foram identificadas 63 cicatrizes com a imagem Landsat 5-TM e 121 cicatrizes com as imagens do Google Earth®. Os principais tipos de movimentos de massa mapeados são escorregamentos translacionais rasos e corrida de detritos. A identificação das cicatrizes foi possível devido às diferenças de tonalidade, cor, matiz e textura nas imagens orbitais após a ocorrência desses processos. Os resultados obtidos representam um passo inicial para a análise da suscetibilidade da área.

Palavras-chave: Inventário de Escorregamentos; Processamento Digital de Imagens; Imagens de Satélite; Geoprocessamento.

Identification of Landslides Scars in the Eastern Edge of the Paraná Basin Based on Landsat 5-TM Images

ABSTRACT

Mass movements are natural phenomena characterized by the downslope movement of soil and rock. When these processes occur in urban areas they can cause economic losses, social impacts and, in extreme cases, loss of human lives. In an attempt to mitigate such disasters, it is necessary to map sites affected by them, since recent landslides may suggest future patterns of instability. In this sense, this study aimed to map the mass movement scars in a segment of the Eastern Edge of the Paraná Basin, through the processing of a Landsat 5-TM image, 220/80 orbit-point and date of passage 08/28/2009. To facilitate the recognition of these features, RGB color compositions and image processing techniques such as contrast stretching, ratio between bands and Principal Component Analysis (PCA) were applied. In order to validate the inventory, high-resolution images available at Google Earth® software were used. Totally, 63 scars were identified with the Landsat 5-TM image and 121 with Google Earth® images. The main types of mass movements mapped are translational landslides and debris flows. The identification of the scars was possible due to differences in tone, color, hue and texture at the orbital images after the occurrence of such processes. Results obtained represent an initial step towards the susceptibility analysis of the area.

Keywords: Landslide inventory; Digital image processing; Satellite images; Geoprocessing.

Introdução

Movimentos de massa são fenômenos naturais caracterizados pelo deslocamento de solo e rocha vertente abaixo sob a influência da ação da gravidade (Bigarella, 2003). São processos marcantes na

evolução da paisagem, principalmente em regiões montanhosas e serranas. Embora façam parte da dinâmica superficial do planeta, quando esses desastres ocorrem em ambientes ocupados pelo homem, podem provocar

perdas econômicas, impactos sociais e ambientais e, em casos extremos, perda de vidas humanas.

No Brasil, os escorregamentos são um dos desastres mais frequentes e destrutivos, tendo resultado em, pelo menos, 3.355 mortes entre os anos de 1988 e 2013, segundo o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT, 2014). Estima-se que, aproximadamente, 5,87 milhões de pessoas ficaram desalojadas, desabrigadas ou feridas em decorrência desses processos no período de 1991 a 2012 (UFSC e CEPED, 2013).

Além de danos humanos, os movimentos de massa causam prejuízos econômicos de grande monta. Como exemplo, cita-se a catástrofe que ocorreu na Região Serrana do Rio de Janeiro em 2011 e ocasionou, segundo estimativas do Banco Mundial (2012), um prejuízo de cerca de 4,8 bilhões de reais.

Com o intuito de mitigar os impactos destes desastres, torna-se necessário identificar os locais já afetados pelos mesmos, através da elaboração de inventários. Esses cadastros contêm a localização espacial dos movimentos de massa e podem incluir informações como o tipo do movimento, distância de deslocamento, volume, estado de atividade, data de ocorrência, entre outras (Soeters e van Westen, 1996; Fell et al., 2008).

Os inventários são fundamentais na previsão de novos processos, uma vez que as condições em que movimentos de massa ocorreram no passado podem ser indicativas de futuros padrões de instabilidade (Mantovani et al., 1996). Além disso, eles proporcionam elementos fundamentais para compreender os fatores condicionantes, mecanismos de falha, frequência de ocorrência, e danos decorrentes desses desastres (Guzzetti et al., 2012). Nesse sentido, ressalta-se que os inventários são a base para a produção de mapas de suscetibilidade, perigo e risco, bem como a principal ferramenta utilizada na validação dos mesmos (Parise, 2001; Fell et al., 2008; Guzzetti et al., 2012).

As técnicas tradicionais de mapeamento de cicatrizes se baseiam em trabalhos de campo e dependem do conhecimento prévio da área por um especialista (Brunsden, 1985). Essa tarefa demanda grandes esforços e elevados custos, principalmente quando os movimentos de massa são numerosos e a área de estudo é ampla (Joyce et al., 2009). Além disso, Petley et al. (2002) ressaltam que, em áreas com elevadas declividades e altitudes, a avaliação direta das cicatrizes no campo torna-se impraticável devido à dificuldade de acesso.

Em decorrência desta problemática, vários estudos referentes ao mapeamento de cicatrizes de movimentos de massa têm sido desenvolvidos com a utilização de imagens de sensores orbitais, sendo este o método mais empregado atualmente (e.g. Florenzano, 1993; Walsh e Butler, 1997; Zinck et al., 2001; Estrada et al., 2001; Marcelino et al., 2003; Vohora e Donoghue, 2004; Barlow et al., 2003; Sarkar e Kanungo, 2004; Nichol et al., 2006; Borghuis et al., 2007; Saraf et al., 2009; Marcelino et al., 2009; Dai et al., 2011; Gorum et al., 2011; Stumpf e Kerle, 2011; Miller, 2011; Shanabi et al., 2012; Martha et al., 2012; Anjos e Sena, 2012; Xu

et al., 2013; Xu, 2014; Shanabi et al., 2014; Murillo-García et al., 2014; Roessner et al., 2015).

Estes estudos são possíveis porque a exposição do solo e até mesmo da rocha mãe e consequente deposição do material transportado ao longo da vertente, implica em mudanças nas características espectrais da superfície, imprimindo diferenças de tonalidade, cor, matiz e textura na cena imageada, as quais podem ser detectadas pelos sensores orbitais (McKean et al., 1991). Dessa maneira, as imagens multiespectrais constituem-se numa ferramenta importante para a elaboração de inventários, simplificando e tornando ágil esse procedimento, de modo a fornecer suporte a tomada de decisão a um baixo custo.

Apesar da evidente importância dos mapas inventário, a utilização de imagens de sensoriamento remoto para a sua elaboração é ainda escassa no Brasil, com poucas aplicações na literatura (e.g. Marcelino et al., 2003; Marcelino et al., 2009; Entralgo et al., 2013). Outra limitação existente deve-se ao fato de que os mapas produzidos não são, em sua grande parte, validados com informações independentes, obtidas a partir de fotografias aéreas, imagens com maior resolução, ou até mesmo levantamentos de campo (Guzzetti et al., 2012).

Diante do exposto, este trabalho tem por objetivo mapear as cicatrizes de movimentos de massa em um segmento dos Patamares da Borda Oriental da Bacia do Paraná, a partir do uso de uma imagem Landsat 5-TM. A metodologia proposta será aplicada em uma área localizada na divisa entre os estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul, entre as coordenadas UTM do fuso 22, 568000 mE e 616000 mE e 6733000 mN 6831000 mN, onde é frequente a ocorrência desses fenômenos. Para tanto, utilizaram-se técnicas de processamento digital de imagens (PDI), análise espacial e ferramentas de geoprocessamento.

Mapeamento de movimentos de massa com o uso de imagens de média resolução espacial

A utilização de imagens de média resolução espacial na elaboração de inventários de movimentos de massa é possível devido à aplicação de rotinas de realce que salientam essas feições. Devido ao contraste proporcionado por essas técnicas, diversos inventários foram elaborados com base em imagens de sensores orbitais de média resolução, como por exemplo, os sensores da série Landsat TM e ETM+ (e.g. McKean, 1991; Florenzano, 1993; Greenbaum et al., 1995; Mantovani et al., 1996; Walsh e Butler, 1997; Singhrow et al., 1998; Sestini, 1999; Zinck et al., 2001; Estrada et al., 2001; Petley et al., 2002; Vohora e Donoghue, 2004; Sestini e Florenzano, 2004; Marcelino et al., 2009; Anjos e Sena, 2012; Shanabi et al., 2014; Roessner et al., 2015).

No entanto, apesar dos benefícios diretos da utilização de ferramentas de sensoriamento remoto, apenas grandes cicatrizes podem ser identificadas com o uso de imagens de média resolução (Marcelino et al., 2009). A exemplo disso, Mantovani et al. (1996) elaboraram uma relação entre a resolução espacial e o tamanho das cicatrizes de movimentos de massa

passíveis de serem identificadas com o emprego de diferentes sensores e imagens aéreas (Tabela 1). Por exemplo, ao se utilizar imagens pancromáticas do satélite SPOT PAN, com resolução espacial de 10 metros, só é possível identificar escorregamentos com dimensões superiores a 100 metros (10 *pixels*). Da mesma maneira, os autores sugerem que com o uso de imagens do sensor Landsat TM, só é possível mapear cicatrizes com pelo menos 300 metros de largura em cenas com alto contraste e com 1.200 metros em imagens com baixo contraste.

Como exemplo desta limitação, Rosas et al. (1993) ressaltam que ao mapearem cicatrizes de movimentos de massa com o uso de uma imagem SPOT-Pancromática no Maciço da Tijuca, Rio de Janeiro, apenas quatro cicatrizes foram identificadas satisfatoriamente. Elas possuíam um comprimento superior a 70 metros e uma largura média de 13,5 metros. Um total de 19 cicatrizes não foi identificado corretamente, pois além de possuírem dimensões pequenas, as mesmas ocorreram em áreas urbanizadas, onde o comportamento espectral desses alvos é muito semelhante à resposta de outras atividades urbanas

como, por exemplo, áreas desocupadas e terrenos em construção.

Apesar destas restrições, alguns estudos conseguiram mapear com sucesso movimentos de massa com o uso de imagens de média resolução, principalmente aqueles de maior dimensão e localizados em áreas florestadas, onde os movimentos deixam sinais claros de sua ocorrência. A exemplo disso, Nichol e Wong (2005) mapearam satisfatoriamente 70% de um total de 495 cicatrizes na Ilha Lantau, Hong Kong com a utilização de imagens SPOT. Estes autores ressaltam que inclusive movimentos pequenos, com larguras entre 7 e 10 metros, foram mapeados. De maneira similar, Barlow et al. (2003) obtiveram uma acurácia de 75% na identificação de cicatrizes no vale do Rio Chilliwack, no Canadá, com o uso de imagens Landsat 7 ETM+. Mais recentemente, Larsen e Montgomery (2012) elaboraram um inventário multi-temporal com mais de 15.000 escorregamentos no Himalaya a partir de imagens Landsat TM/ETM+ e ASTER. Segundo esses autores, a principal vantagem dessas imagens refere-se a existência de uma cobertura mundial, bem como a sua ampla resolução temporal.

Tabela 1. Relação entre a resolução espacial e o tamanho de cicatrizes de movimentos de massa passíveis de serem identificadas por meio de diferentes sensores e imagens aéreas (Fonte: Mantovani et al., 1996).

Sensores	Resolução espacial (m)	Alto contraste (m)	Baixo contraste (m)
Landsat MSS	80	800	3.200
Landsat TM/ETM+	30	300	1.200
Spot XS	20	200	800
ETM PAN	15	150	600
Spot PAN	10	100	400
Foto aérea 1:50.000	0,5	5	20
Foto aérea 1:25.000	0,25	2,5	10
Foto aérea 1:10.000	0,10	1	4

Material e Métodos

Caracterização da área de estudo

Esse estudo foi realizado em segmento dos Patamares da Borda Oriental da Bacia do Paraná, localizado no nordeste do estado do Rio Grande do Sul e sudeste de Santa Catarina (Figura 1). Essa região engloba, total ou parcialmente, 20 municípios e compreende uma área de aproximadamente 4.704 km². O clima predominante enquadra-se, segundo a classificação climática de Köppen-Geiger, como sendo subtropical úmido (Cfa), por registrar valores de temperatura média entre -3°C e 18°C no mês mais frio e superior a 22°C no mês mais quente.

A geomorfologia da região caracteriza-se por um planalto formado por derrames basálticos na base e riolíticos no topo. As bordas terminais apresentam uma escarpa festonada e dissecada pela erosão fluvial, que formou um sucessivo escalonamento de patamares estruturais (UFSM e SEMA, 2007). Essas estruturas

constituem-se de uma superfície plana que interrompe a continuidade do declive de uma forma abrupta, dando lugar a paredões verticais encaixados em estruturas tectônicas, com declividades superiores a 100% (Figura 2). Essas características, aliadas à presença de um manto de alteração pouco espesso, conferem à região uma elevada suscetibilidade a movimentos de massa.

Essa área foi escolhida para o estudo, sobretudo, por apresentar um histórico de ocorrência de movimentos de massa. No dia 23 de dezembro de 1995, a região foi severamente afetada por corridas de detritos, enxurradas e escorregamentos, os quais foram ocasionados por precipitações excepcionais, concentradas em poucas horas. Na Figura 3, é possível observar a grande quantidade de cicatrizes de movimentos de massa deixadas na superfície durante esse evento, bem como o entulhamento dos leitos dos rios com os sedimentos oriundos das encostas. Em decorrência dessa catástrofe, centenas de pessoas

ficaram desabrigadas, desalojadas e feridas e pelo menos 29 morreram. Além disso, houve grande perda de solo agricultável, o que prejudicou uma das principais atividades econômicas da região (Pellerin et

al., 1997; Silveira, 2003). Entre as bacias mais afetadas por esse desastre destacam-se as bacias do Rio Figueira e Fortuna, localizadas em Timbé do Sul (SC), e do Rio Pinheirinho, em Jacinto Machado (SC).

Figura 1. Localização da área de estudo e suas unidades geomorfológicas. Fonte: IBGE (2005; 2006).

Figura 2. Perfil topográfico transversal de um segmento da Borda Oriental da Bacia do Paraná-RS.

Além desta catástrofe, Pereira (2008) ressalta que ocorreram desastres na região nos anos de 1958, 1968, 1974, 1979, 1985, 1998, 2001, 2002, 2003, 2007. Isso evidencia que fenômenos semelhantes ao ocorrido em

1995 não são casos isolados na história da evolução e configuração do relevo dessa região, sendo que novos processos podem ocorrer futuramente.

Figura 3. Corrida de detritos em Timbé do Sul, dezembro de 1995. Fonte: Monteiro (1996).

Procedimentos Metodológicos

O mapeamento das cicatrizes foi realizado a partir do processamento de uma imagem do satélite Landsat 5, sensor TM (*Thematic Mapper*), órbita 220, ponto 80, com data de passagem de 28/08/2009 e com correção geométrica nível 1. O critério para a seleção desta imagem foi a ausência de nuvens. Utilizou-se também uma imagem orto-retificada do Landsat 5 GLS2005, sensor TM, órbita 220, ponto 80, data de passagem 04/11/2005. Ambas as imagens foram adquiridas no formato GeoTiff, possuem resolução espacial de 30 x 30 metros (exceto a banda 6 termal), resolução radiométrica de 8 *bits/pixel* e foram extraídas

gratuitamente do catálogo de imagens do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

A correção geométrica da imagem Landsat 5-TM foi realizada por meio de treze pontos de controle observados na imagem orto-retificada Landsat 5-TM GLS2005 (bandas 3, 4 e 5), como recomendado por Rovani et al. (2013) (Tabela 2). A qualidade da correção foi estimada pelos valores de erros quadráticos médios e resíduos em relação aos pontos de controle.

Após esta correção, a imagem foi recortada para os limites da área de estudo, definida pelas coordenadas UTM (*Universal Transversa de Mercator*) do fuso 22,

Datum WGS84 (*World Geodetic System 1984*), 568.000 mE e 616.000 mE e 6.733.000 mN 6.831.000 mN. Para realizar o processamento digital dessas

imagens utilizou-se o *software* ENVI 4.7. Além disso, o programa ArcMap® 9.3 foi aplicado na edição final dos mapas temáticos.

Tabela 2. Pontos de controle utilizados para a correção geométrica da imagem Landsat 5-TM.

Ponto	Coordenadas UTM – WGS 84	
	X	Y
1	569.713,40	6.830.013,94
2	570.383,93	6.831.107,92
3	575.256,68	6.830.855,27
4	583.322,72	6.824.901,72
5	601.957,53	6.829.134,00
6	611.113,88	6.824.665,88
7	607.425,62	6.743.607,30
8	572.499,77	6.739.622,65
9	570.854,40	6.763.264,43
10	569.199,91	6.788.965,29
11	597.003,88	6.785.094,30
12	596.299,52	6.813.596,30
13	611.944,47	6.761.250,57

A seleção das composições coloridas que melhor realçam as feições escorregamentos se baseou nas respostas espectrais dos alvos e na análise estatística da imagem Landsat 5-TM, como a média dos níveis de cinza (Tabela 3), variância-covariância (Tabela 4) e correlação entre bandas (Tabela 5). Além disso,

consideraram-se as composições adotadas em estudos similares, que utilizaram imagens da série Landsat (e.g. Sestini, 1999; Estrada et al., 2001; Marcelino et al., 2003; Antinao e Farfán, 2013). A partir dessa revisão, testaram-se as composições coloridas 547 RGB, 321 RGB, 453 RGB, 473 RGB e 473 RGB.

Tabela 3. Média dos níveis de cinza e desvio padrão da imagem Landsat 5-TM.

Banda	Média	Desvio padrão
1	48,11	6,21
2	20,13	4,12
3	19,22	7,02
4	48,18	15,21
5	52,86	22,79
7	20,43	10,68

Tabela 4. Matriz de variância-covariância da imagem Landsat 5-TM.

Banda	1	2	3	4	5	7
1	38,5	23,7	36,4	15,7	81,4	41,4
2	23,7	17,0	26,8	15,7	64,4	31,9
3	36,4	26,8	49,3	10,1	121,4	62,6
4	15,7	15,7	10,1	231,5	158,5	38,6
5	81,4	64,4	121,4	158,5	519,7	229,8
7	41,4	31,9	62,6	38,6	229,8	114,1

Tabela 5. Matriz de correlação entre as bandas da imagem Landsat 5-TM.

Banda	1	2	3	4	5	7
1	1,00	0,92	0,83	0,16	0,57	0,62
2	0,92	1,00	0,92	0,25	0,68	0,72
3	0,83	0,92	1,00	0,09	0,75	0,83
4	0,16	0,25	0,09	1,00	0,45	0,23
5	0,57	0,68	0,75	0,45	1,00	0,94
7	0,62	0,72	0,83	0,23	0,94	1,00

O primeiro procedimento adotado para facilitar a interpretação visual das cicatrizes foi a Ampliação Linear de Contraste (ALC). Essa técnica aumenta a variância dos dados e possibilita, consequentemente, um melhor contraste (Sestini e Florenzano, 2004). A partir da mesma, expandem-se dos valores de níveis de cinza (NC), os quais são redistribuídos linearmente em uma escala contínua, que varia de 0 a 255, em imagens de 8 *bits* (Santos, 2013). A ALC foi aplicada nas seis bandas da imagem Landsat 5-TM (excluída a banda termal) e, posteriormente, nas imagens resultantes da razão entre as bandas. Ressalta-se que, apesar de ser uma ferramenta eficiente, a saturação da imagem pode resultar em uma perda de informação significativa (Florenzano, 2011).

O segundo método empregado foi a razão entre as bandas. Esse procedimento permite discriminar diferenças sutis no comportamento espectral de alvos distintos. Foram selecionadas bandas pouco correlacionadas, como a TM 4 e TM 3, de modo a proporcionar o realce do solo exposto. A razão entre estas bandas evidencia as diferenças da cobertura vegetal, enfatizando as variações existentes entre o infravermelho (TM 4) e o visível (TM 3). Portanto, testaram-se as razões 4/3, 4/1 e 5/7. Além destas razões, elaborou-se o índice de vegetação com diferença normalizada (NDVI - *Normalized Difference Vegetation Index*). Esse índice auxiliou a diferenciar as áreas vegetadas em relação às áreas com escassa ou nenhuma cobertura vegetal, sendo um forte indicador de movimentos de massa.

Posteriormente, aplicou-se a Análise por Componentes Principais (PCA - *Principal Component Analysis*), com o objetivo de gerar bandas não correlacionadas e, assim, eliminar a repetição de dados (Rovani et al., 2012). A PCA realiza a transformação linear das bandas originais, gerando novas variáveis, denominadas componentes principais (CP). Foram geradas imagens CP a partir das bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7 da imagem Landsat 5-TM. Com as imagens CP

obtidas, testaram-se diversas composições RGB, como por exemplo, CP 453, CP 472 e CP 321.

O mapeamento das cicatrizes de movimentos de massas nas imagens processadas foi realizado a partir da vetorização manual de polígonos. Segundo Harp et al. (2011), a utilização de polígonos para representar as cicatrizes permite que os resultados obtidos sejam empregados para realizar a análise estatística dos movimentos em relação às outras variáveis espaciais, tais como fatores condicionantes e deflagradores.

A interpretação destas feições foi realizada visualmente, com base nos elementos de análise de imagens, como por exemplo, textura, tonalidade, cor, forma, padrão e contexto. Para auxiliar na diferenciação entre as cicatrizes e os locais com solo exposto, utilizou-se o Modelo Digital de Elevação (MDE) elaborado por Weber et al. (2004) a partir de imagens SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), bem como o mapa de declividades derivado deste MDE (Figura 4). Esse procedimento garantiu maior segurança na interpretação das cicatrizes, permitindo analisar o contexto por meio da avaliação da forma das vertentes. No entanto, ressalta-se que a interpretação visual pode ser considerada subjetiva, visto que a mesma depende de vários fatores, como por exemplo, o tipo, a altitude e a densidade de vegetação, além da experiência do intérprete.

Por fim, utilizou-se o *software* Google Earth® para validar as cicatrizes mapeadas e complementar o mapa inventário elaborado. Foram utilizadas imagens de alta resolução espacial de satélites como o QuickBird, com resolução de 2,4 metros e o Worldview-1, com resolução de 0,5 metros, observando-se a maior proximidade possível da data de obtenção da imagem Landsat TM-5. As cicatrizes foram delimitadas com o auxílio da ferramenta "adicionar polígonos", seguindo as bordas perceptíveis dos movimentos de massa, sem fazer distinção entre as áreas de falha e de deposição de detritos.

Figura 4. Modelo digital de elevação (MDE) e mapa de declividades da área de estudo.

Resultados e Discussão

O erro obtido na correção geométrica da imagem Landsat 5-TM foi de 0,76 *pixels*, considerado satisfatório para áreas densamente florestadas e de relevo montanhoso (Xu et al., 2010). Este erro também está dentro do limite admissível considerando-se a escala do mapa e a finalidade deste estudo (NETGIS, 1997).

A técnica ALC, aplicada nas bandas selecionadas para obter as composições coloridas, apresentou bons resultados. A mesma possibilitou expandir os níveis de cinza da imagem original, os quais se encontravam concentrados em um pequeno intervalo, aumentando, dessa maneira, o contraste entre os diferentes alvos na imagem Landsat 5-TM.

A seleção das bandas para a obtenção de composições coloridas foi subsidiada pela análise dos parâmetros estatísticos da imagem (Tabelas 3, 4 e 5). Analisando a Tabela 5, percebe-se que existe uma alta correlação entre as bandas TM 5 e TM 7, TM 2 e TM 1, TM 2 e TM 3, e TM 3 e TM 7. Por outro lado, as bandas TM 3 e TM 4, TM 2 e TM 4 e TM 4 e TM 7 apresentam baixa correlação e, dessa maneira, proporcionam um maior contraste entre as áreas vegetadas e aquelas com solo exposto. Dessa forma, as composições coloridas falsa cor TM 453 RGB e TM 473 RGB foram as que mais contribuíram para o realce das feições de cicatrizes, conferindo tonalidades alaranjadas às formações vegetais (Figura 5).

Optou-se por utilizar a composição 453 RGB para elaborar o inventário. Essa escolha vem ao encontro das observações de Florenzano (1993), que destaca a importância da composição TM 453 no mapeamento de

escorregamentos, principalmente por salientar a morfologia, as áreas úmidas e a rede de drenagem. Essa composição colorida também foi utilizada por Marcelino et al. (2003) e por Antinao e Farfán (2013) ao mapearem os movimentos de massa nas encostas da Serra Geral, em Santa Catarina, e na Península da Baixa Califórnia, no México, respectivamente. Ambos os autores destacaram a composição TM 453 RGB como sendo a mais apropriada para a identificação de movimentos de massa.

A razão entre as bandas TM 4/3 contrastada pela técnica ALC (Figura 6), permitiu realçar as áreas não vegetadas, visto que o solo exposto tem resposta alta a partir da banda 3 e a vegetação apresenta um pico de refletância na banda 4 (Sestini, 1999). O índice NDVI também auxiliou na distinção das áreas desprovidas de cobertura vegetal. Ao analisar o NDVI, apresentado na Figura 6, verifica-se que os setores da cena com vegetação escassa, como aqueles referentes às cicatrizes e feições erosivas, são representados em tons de cinza médio escuros.

No entanto, apesar de destacarem o solo exposto, as imagens resultantes destas operações não permitiram diferenciar as feições erosivas das cicatrizes de movimentos de massa. Barlow et al. (2003) observaram a mesma limitação ao utilizarem imagens do sensor TM para mapear escorregamentos no vale do Rio Chilliwack, no Canadá. Isso ocorre devido à similaridade de resposta espectral das feições erosivas e de escorregamentos, pois a razão entre bandas atenua as diferenças existentes entre alvos cujo comportamento espectral seja semelhante (Sestini e Florenzano, 2004).

Figura 5. Composições coloridas 453 RGB, 473 RGB e 321 RGB utilizadas na identificação das cicatrizes de movimentos de massa na área de estudo.

Figura 6. Resultado da razão entre bandas TM 4/3 e índice NDVI da imagem Landsat 5-TM.

Nesse sentido, Joyce et al. (2009) ressaltam que não existe uma curva espectral específica para as cicatrizes de movimentos de massa em qualquer faixa do visível ou em outras bandas do espectro eletromagnético. Sendo assim, a assinatura espectral dos movimentos de massa não é inconfundível, e a detecção e mapeamento destes fenômenos a partir do uso de imagens de satélite continuam sendo uma tarefa desafiante (Guzzetti et al., 2012). Dessa maneira, a sua identificação deve ser realizada com o apoio de ferramentas complementares que permitam analisar o contexto, como por exemplo, curvas de nível, MDE, mapas de declividade, entre outras.

Os resultados da avaliação por componentes principais (PCA) mostraram-se interessantes, visto que

as bandas CP exibem de forma realçada as feições erosivas. As primeiras bandas CP estão livres de ruído. No entanto, a CP 7 possui um ruído elevado e, desta forma, não foi considerada na análise. A composição colorida CP 453 RGB apresentou visualmente os melhores resultados, permitindo identificar locais com solo exposto (Figura 7). Em um estudo similar, Sestini (1999) utilizou a composição CP 321 para diferenciar movimentos do tipo queda de blocos e escorregamentos de solo. Apesar de este autor ter considerado a composição CP 321 como a melhor na discriminação dos escorregamentos, ele também destacou a importância da composição CP 453 no mapeamento de feições erosivas.

Figura 7. Composição CP 453 RGB, destacando áreas com solo exposto.

Entre todas as imagens elaboradas, a composição 453 RGB e o índice NDVI foram selecionadas como as mais adequadas para identificar as cicatrizes na área de estudo e serviram, desta forma, como base para o mapeamento inventário. Além disso, as imagens do Google Earth® foram utilizadas para validar e complementar o mapeamento. A Figura 8 apresenta o mapa inventário obtido, com um total de 121 cicatrizes identificadas.

Os movimentos de massa cadastrados se concentram, exclusivamente, nas escarpas em anfiteatro ao longo dos Patamares da Bacia do Paraná, principalmente nas vertentes côncavas e ao longo das linhas de drenagem. O relevo nesses locais é montanhoso, com declividades acentuadas, variando

entre 100% e 200% (Figura 4). As cicatrizes possuem formas predominantemente alongadas, sendo classificadas, de maneira geral, como escorregamentos translacionais rasos e, em alguns casos, como corrida de detritos. Ressalta-se que processos como quedas de blocos, rastejos e tombamentos não foram considerados neste trabalho, visto que esses processos possuem uma distribuição descontínua no espaço e, por conseguinte, requerem um tratamento diferente para a sua identificação.

Ao analisar a distribuição das cicatrizes por município de ocorrência, observa-se que a cidade de Timbé do Sul (SC) foi a mais afetada, com 52 escorregamentos, ou seja, 42% do total de movimentos. Acredita-se que esses escorregamentos são vestígios

dos fluxos de detritos que ocorreram em dezembro de 1995 na região. O segundo município mais afetado foi Praia Grande (SC), com 39 processos ou 32% do total. Os 30 movimentos de massa restantes ocorreram distribuídos nos municípios de Jacinto Machado (SC), Mampituba (RS), Maquiné (RS), Morro Grande (SC), São José dos Ausentes (RS), Cambará do Sul (RS), Morrinhos do Sul (RS), Três Forquilhas (RS) e Itati (RS), com 8, 6, 4, 2, 2, 2, 2, 2, 2 registros, respectivamente.

O histograma com a área das cicatrizes mapeadas em m² está apresentado na Figura 9. Os movimentos

apresentam diversas dimensões, desde muito grandes, como aquele localizado no município de Timbé do Sul (SC), com uma área de aproximadamente 491.300 m² (zoom da Figura 8), bem como cicatrizes pequenas, com áreas inferiores a 1.000 m². Observa-se uma distribuição bastante assimétrica, com valores médios de 34.375 m² e um desvio padrão de 71.932. Destaca-se que a grande maioria das cicatrizes, cerca de 52%, possui área superior a 10.000 m².

Figura 8. Inventário de cicatrizes de movimentos de massa sobreposto ao índice NDVI.

Conforme mencionado anteriormente, as feições de interesse identificadas foram validadas com imagens de alta resolução espacial disponíveis no Google Earth®. Ao total, foram mapeados 63 movimentos de massa nas imagens processadas derivadas do Landsat 5-TM e 58 processos com o apoio das imagens do Google Earth®. Dessa forma, constata-se que, apesar da aplicação de diversos procedimentos para realçar as cicatrizes, apenas 52% dos movimentos foram mapeados satisfatoriamente com o uso de uma imagem orbital de média resolução processada, sendo necessária a utilização de ferramentas de apoio para se alcançar o resultado esperado.

A resolução espacial das imagens do sensor TM da série Landsat continua a ser uma limitação significativa

para o mapeamento de cicatrizes, corroborando os resultados encontrados por outros autores (Sestini e Florenzano, 2004; Lopes et al., 2007; Anjos e Sena, 2012). Assim, na imagem Landsat 5-TM só foi possível identificar escorregamentos com áreas superiores a 10.000 m², o que confirma os resultados obtidos por Barlow et al. (2003).

Além desta limitação, a identificação das cicatrizes foi realizada a partir de interpretação visual e, por conseguinte, alguns movimentos delimitados estão sujeitos a erros de interpretação, principalmente em movimentos de massa superpostos ou com cobertura parcial de vegetação. Para contornar esse problema seria interessante testar a aplicação de técnicas de detecção automática de movimentos de massa, por

meio de métodos como, por exemplo: índice limiar (e.g. Rosin e Hervás, 2005), agrupamento supervisionado e não-supervisionado (e.g. Borghuis et al., 2007; Parker et al., 2011), métodos de detecção de

mudanças (Yang e Chen, 2010), e análise de imagens orientada a objetos (Martha et al., 2010; Stumpf e Kerle, 2011).

Figura 9. Histograma das áreas (m²), das cicatrizes de movimentos de massa.

Ainda, como sugestão para complementar este estudo, propõem-se a elaboração sistemática de inventários multi-temporais com a utilização de imagens orbitais de alta resolução e fotografias aéreas. De acordo com Guzzetti (2006), esta é a forma mais avançada de inventário de movimentos de massa, visto que os mesmos apresentam a evolução no espaço e no tempo desses processos.

No entanto, apesar das limitações existentes, o inventário elaborado neste estudo constitui-se no mais razoável possível, dado a resolução das imagens disponíveis gratuitamente, bem como a metodologia empregada. Acredita-se que o produto elaborado é compreensível e flexível, e pode servir como base para futuros estudos e execução de cartografia de suscetibilidade.

Conclusões

Os resultados obtidos permitem concluir que a aplicação de diferentes técnicas de processamento digital de imagens contribui para melhorar a qualidade dos dados, permitindo destacar as feições de movimentos de massa. A razão entre bandas, assim como a elaboração de índices, mostraram-se fundamentais para diferenciar as áreas com cobertura vegetal daquelas com solo exposto. A composição 453 RGB e o NDVI foram as imagens que mais auxiliaram na delimitação dos movimentos de massa. Além disso, a análise de contexto e da forma das vertentes, por meio do MDE e do mapa de declividades, contribuiu substancialmente para mapear com maior precisão as feições de cicatrizes.

A resolução espacial das imagens do sensor TM constitui-se numa limitação importante para o mapeamento de cicatrizes, sendo que apenas 52% das cicatrizes foram mapeadas satisfatoriamente nas imagens processadas. No entanto, apesar destas restrições, imagens de média resolução podem ser

utilizadas para mapear preliminarmente o solo exposto, reduzindo a área de busca e, dessa forma, otimizando a aplicação de recursos. Nesse sentido, os resultados obtidos representam um passo inicial para a análise de suscetibilidade da área, servindo assim como um produto indispensável para auxiliar os processos de tomada de decisão referentes à redução de riscos na região.

Agradecimentos

Agradeço aos revisores pelas sugestões, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de mestrado (processo número 131160/2012-5) e à Professora Dejanira Saldanha pelo auxílio no processamento dos dados na disciplina de Processamento Digital de Imagens do Programa de Pós Graduação em Sensoriamento Remoto da UFRGS, bem como pelas sugestões na versão prévia do manuscrito.

Referências

- Anjos, S.D.; Sena, I. 2012. Extração de cicatrizes de movimentos de massa na região de Cubatão – SP por meio de técnicas de interpretação de imagens, in: Simpósio Nacional de Geomorfologia, 9. Anais... UFRJ, Rio de Janeiro.
- Antinao, J.L.; Farfán, L.M. 2013. Occurrence of landslides during the approach of tropical cyclone Juliette (2001) to Baja California Sur, Mexico. *Atmósfera* 26, 183-208.
- Banco Mundial. 2012. Avaliação de perdas e danos: inundações e deslizamentos na região Serrana do Rio de Janeiro-Janeiro de 2011. Banco Mundial, Governo do Estado do Rio de Janeiro Brasília, Brasília.
- 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. *Canadian Journal of Remote Sensing* 29, 510-517.
- Bigarella, J.J. 2003. Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais. 1. ed. 3 vol. Editora da UFSC, Florianópolis.
- Borghuis, A.M.; Chang, K.; Lee, H.Y. 2007. Comparison between automated and manual mapping of typhoon-triggered landslides from SPOT-5 imagery. *International Journal of Remote Sensing* 28, 1843-1856.
- Brunsdon, D. 1985. Landslide types, mechanisms, recognition, identification, in: *Landslides in the South Wales Coalfield. Proceedings... The Polytechnique of Wales, Wales*, pp. 19-28.
- Dai, F.C.; Xu, C.; Yao, X.; Xu, L.; Tu, X.B.; Gong, Q.M. 2011. Spatial distribution of landslides triggered by the 2008 Ms 8.0 Wenchuan earthquake, China. *Journal of Asian Earth Sciences* 40, 883-895.
- Entralgo, J.F.T. 2013. Análise espacial e estatística dos movimentos de massa deflagrados pelas chuvas dos dias 11 e 12 de janeiro de 2011 na região serrana do estado do Rio de Janeiro, Brasil. Dissertação (Mestrado). Brasília, Universidade de Brasília.
- Estrada, M.; Kohiyama, M. 2001. Detection of damage due to the 2001 El Salvador earthquake using Landsat images, in: *Asian Conference on Remote Sensing, 22., Proceedings... CRISP, SISV, AARS, Singapore*, pp. 1372-1377.
- Fell, R.; Corominas, J.; Cascini, L.; Leroi, E.; Savage, W.Z. 2008. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land-use planning. *Engineering Geology* 102, 99-111.
- Florenzano, T.G. 1993. Unidades geomorfológicas da região sudeste (SP) identificadas por imagens de satélite. Tese (Doutorado). São Paulo, Universidade de São Paulo.
- Florenzano, T.G. 2011. Iniciação em sensoriamento remoto. 3ª ed. Oficina de Textos, São Paulo. ISBN: 9788579750168.
- Gorum, T.; Fan, X.M.; van Westen, C.J.; Huang, R.Q.; Xu, Q.; Tang, C.; Wang, G.H. 2011. Distribution pattern of earthquake-induced landslides triggered by the 12 May 2008 Wenchuan earthquake. *Geomorphology* 133, 152-167.
- Greenbaum, D.; Rowker, M.R.; Dau, I.; Dropsy, H.; Grealley, K.B.; Mc Donalt, A.J.W.; Marsh, S.H.; Morthmore, K.J.; O'Connor, E.A.; Prasad, S.; Tragheim, D.G. 1995. Rapid methods of landslides hazard mapping: Fiji case study. Technical Report WC/95/28. British Geological Survey, Nottingham.
- Guzzetti, F. 2006. Landslide hazard and risk assessment. Tese (Doutorado). Bonn, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn.
- 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.
- Harp, E.L.; Keefer, D.K.; Sato, H.P.; Yagi, H. 2011. Landslide inventories: the essential part of seismic landslide hazard analyses. *Engineering Geology*, 122, 9-21.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2005. Malha municipal digital do Brasil 2005. Escala 1:250.000. IBGE, Brasília. Disponível: <ftp://geoftp.ibge.gov.br/malhas_digitais/municipio_2005/escala_500mil/proj_geografica/arcview_shp/uf/>. Acesso: 26 fev. 2015.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2006. Mapa de unidades do relevo do Brasil. Escala 1:5.000.000. IBGE, Brasília. Disponível: <www.ibge.gov.br/ibgeteen/atlascolar/mapas_pdf/brasil_unidades%20de%20relevo.pdf>. Acesso: 26 fev. 2015.
- IPT. Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 2014. Mortes por deslizamentos no Brasil. Banco de Acidentes. IPT, São Paulo.
- Joyce, K.E.; Bellis, S.E.; Samsonov, S.V.; McNeill, S.J.; Glassey, P.J. 2009. A review of the status of satellite remote sensing and image processing techniques for mapping natural hazards and disasters. *Progress in Physical Geography* 2, 183-207.
- Larsen, I.J.; Montgomery, D.R. 2012. Landslide erosion coupled to tectonics and river incision. *Nature Geoscience* 5, 468-473.
- Lopes, E.S.S.; Riedel, P.S.; Bentz, C.M.; Ferreira, M.V.; Naletto, J.L.C. 2007. Inventário de escorregamentos naturais em banco de dados geográfico – análise dos fatores condicionantes na região da Serra de Cubatão-SP, in: *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, XIII. Anais... INPE, Florianópolis*, pp. 2785-2796.
- Mantovani, F.; Soeters, R.; van Westen, C.J. 1996. Remote sensing techniques for landslides studies and hazard zonation in Europe. *Geomorphology* 15, 213-225.
- Marcelino, E.V.; Fonseca, L.M.G.; Ventura, F.; Santa Rosa, A.N.C.; Formaggio, A.R. 2003. Evaluation of image fusion techniques for the identification of landslide scars using satellite data. *Geografia (Rio Claro)* 28, 431-445.
- Marcelino, E.V.; Formaggio, A.R.; Maeda, E.E. 2009. Landslide inventory using image fusion techniques in Brazil. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 11, 181-191.
- Martha, T.R.; Kerle, N.; Jetten, V.; van Westen, C.J.; Vinod Kumar, K. 2010. Characterising spectral, spatial and morphometric properties of landslides for semiautomatic detection using object-oriented methods. *Geomorphology* 116, 24-36.
- Martha, T.R.; Kerle, N.; van Westen, C.J.; Jetten, V.; Kumar, K.V. 2012. Object-oriented analysis of multi-temporal panchromatic images for creation of historical landslide inventories. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 67, 105-119.
- McKean, J.; Buechel, S.; Gaydos, L. 1991. Remote sensing and landslide hazard assessment. *Photogrammetric Engineering e Remote Sensing*, v.57, p.1185-1193.
- Miller, A.J. 2011. Identifying landslide activity as a function of economic development: a case study of increased landslide frequency surrounding Dominical, Costa Rica. *Environmental, Development and Sustainability* 13, 901-921.

- Monteiro, K. 1996. O maior deslizamento de terra no Brasil. Disponível: <<http://deslizamento-timbedosul-sc.blogspot.com.br/>>. Acesso: 22 maio 2015.
- Murillo-García, F.G.; Fiorucci, F.; Alcántara-Ayala, I. 2014. Development of a landslide inventory for a region in Mexico using very high resolution satellite stereo-images, in: Sassa, K., Canuti, P., Yin, Y. (Org.), *Landslide science for safer geoenvironment*. cap. IX, pp. 821-828. 1. ed. Springer International Publishing.
- NETGIS, 1997. SPRING 2.0: Sistema de processamento de informações georreferenciadas. v. 2. NETGIS, São José dos Campos.
- Nichol, J.E.; Wong, M.S. 2005. Satellite remote sensing for detailed landslide inventories using change detection and image fusion. *International Journal of Remote Sensing* 26, 1913-1926.
- Nichol, J.E.; Shaker, A.; Wong, M.S. 2006. Application of high-resolution stereo satellite images to detailed landslide hazard assessment. *Geomorphology* 76, 68-75.
- Parise, M. 2001. Landslide mapping techniques and their use in the assessment of the landslide hazard. *Physics and Chemistry of the Earth, Part C: Solar, Terrestrial e Planetary Science* 26, 697-703.
- Parker, R.N.; Densmore, A.L.; Rosser, N.J.; de Michele, M.; Li, Y.; Huang, R.; Whadcoat, S.; Petley, D.N. 2011. Mass wasting triggered by the 2008 Wenchuan earthquake is greater than orogenic growth. *Nature Geoscience* 4, 449-452.
- Pellerin, J.; Duarte, G.M.; Scheibe, L.F.; Mendonça, M.; Buss, M.D.; Monteiro, M.A. 1997. Timbé do Sul – Jacinto Machado: avaliação preliminar da extensão da catástrofe de 23 – 24 dez. 1995. *Revista Geosul* 12, 71-83.
- Pereira, S. 2008. Dinâmica do rio amola faca e os impactos e riscos da barragem de transposição para o Rio do Salto. Monografia (Graduação). Crisciúma, Universidade do Extremo Sul Catarinense.
- Petley, D.N.; Crick, W.D.O.; Hart, A.B. 2002. The use of satellite imagery in landslides studies in high mountain areas, in: *Asian Conference on Remote Sensing*, 23. Proceedings... Asian Association on Remote Sensing, Kathmandu.
- Roessner, S.; Behling, R.; Segl, K.; Golovko, D.; Wetzel, H.U.; Kaufmann, H. 2015. Automated remote sensing based landslide detection for dynamic landslide inventories. In: Sassa, K.; Canuti, P.; Yin, Y. (Org.). *Landslide Science for Safer Geoenvironment*. Cap. III, pp. 325-350. Springer International Publishing.
- Rosas, R.O.; Castro Júnior, E.; Lima, M.M.A.; Nunes, V.M.; Netto, A.L.C. 1993. Utilização de imagem SPOT-Pancromática na detecção de cicatrizes de movimentos de massa rápidos em encostas florestadas - Maciço da Tijuca, RJ, in: *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, VII. Anais... INPE, Curitiba.
- Rosin, P.L.; Hervás, J. 2005. Remote sensing image thresholding methods for determining landslide activity. *International Journal of Remote Sensing* 26, 1075–1092.
- Rovani, F.F.M.; Cassol, R. 2012. Áreas de preservação permanente e conflitos ambientais no município de Barão de Cotegipe (RS): uma análise com auxílio das geotecnologias. *Boletim Goiano de Geografia [online]* 32, 51-70.
- Rovani, F.F.M.; Dambros, G.; Cassol, R. 2013. Aplicação da análise por componentes principais para o mapeamento do uso e ocupação da terra no município de Barão de Cotegipe – RS, in: *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, 16. Anais... INPE, Foz do Iguaçu, pp. 8091-8097.
- Santos, W.A.A. 2013. Uso do sensoriamento Remoto multiespectral para determinação da variação de lâminas d'água das lagoas no município de Nísia Floresta, Rio Grande do Norte, Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física* 6, 1635-1647.
- Saraf, A.K.; Das, J.; Rawat, V. 2009. Satellite based detection of early occurring and co-seismic landslides. *Journal of South Asia Disaster Studies* 2, 47-55.
- Sarkar, S.; Kanungo, D.P. 2004. An integrated approach for landslide susceptibility mapping using remote sensing and GIS. *Photogrammetric Engineering e Remote Sensing* 70, 617-625.
- Sestini, M.F. 1999. Variáveis geomorfológicas no estudo de deslizamentos em Caraguatatuba-SP utilizando imagens TM-Landsat e SIG. Dissertação (Mestrado). São José dos Campos, INPE.
- Sestini, M.F.; Florenzano, T.G. 2004. Caracterização de cicatrizes de deslizamentos por processamento de dados TM Landsat em Caraguatatuba – SP. *Geologia USP Série Científica* 4, 57-69.
- Silveira, R.M. 2003. Propriedades geotécnicas dos solos coluvionares do gasoduto Bolívia-Brasil em Timbé do Sul (SC). Dissertação (Mestrado). Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Shanabi, H.; Ahmad, B.B.; Khezri, S. 2012. Application of satellite remote sensing for detailed landslide inventories using frequency ratio models and GIS. *International Journal of Computer Science Issues* 9, 108-117.
- Shanabi, 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.
- Singhroy, V.; Mattar, K.E.; Gray, A.L. 1998. Landslide characterization in Canada using interferometric SAR and combined SAR and TM images. *Advances in Space Research* 21, 465-476.
- Soeters, R.; van Westen, C.J. 1996. Slope stability: recognition, analysis and zonation, in: Turner, A.K., Schuster, R.L. (Org.), *Landslides investigation and mitigation*. 1ª ed., Cap. 8, pp. 129-177. National Research Council, Washington.
- Stumpf, A.; Kerle, N. 2011. Object-oriented mapping of landslides using random forests. *Remote Sensing of Environment* 115, 2564-2577.
- UFSC. Universidade Federal de Santa Catarina, CEPED. Centro Universitário de Estudos e

- Pesquisas sobre Desastres, 2013. Atlas brasileiro de desastres naturais: 1991 a 2012 - Volume Brasil. 2^a ed. CEPED, UFSC, Florianópolis.
- UFSM. Universidade Federal de Santa Maria, SEMA. Secretaria Estadual do Meio Ambiente, 2007. Relatório final do inventário florestal contínuo do Rio Grande do Sul. UFSM, Santa Maria.
- Vohora, V.K.; Donoghue, S.L. 2004. Application of remote sensing data to landslide mapping in Hong Kong, in: ISPRS Congress, XXXV. Proceedings... ISPRS, Turquia.
- Walsh, S.J.; Butler, D.R. 1997. Morphometric and multispectral image analysis of debris flows for natural hazard assessment. *Geocarto International* 12, 59-70.
- Weber, E.J.; Hasenack, H.; Ferreira, C.J.S. 2004. Adaptação do modelo digital de elevação do SRTM para o sistema de referência oficial brasileiro e recorte por unidade da federação. Centro de Ecologia da UFRGS, Porto Alegre. ISBN: 978-85-63843-02-9.
- Xu, M.; Cao, C.; Zhang, H.; Guo, J.; Nakane, K.; He, Q.; Guo, J.; Chang, C.; Bao, Y.; Gao, J.; Li, X. 2010. Change detection of an earthquake-induced barrier lake based on remote sensing image classification. *International Journal of Remote Sensing* 31, 3521-3534.
- Xu, C.; Xu, X.W.; Pourghasemi, H.R.; Pradhan, B.; Iqbal, J. 2013. Volume, gravitational potential energy reduction, and regional centroid position change in the wake of landslides triggered by the 14 April 2010 Yushu earthquake of China. *Arabian Journal of Geosciences* 7, 2129-2138.
- Xu, C. 2014. Preparation of earthquake-triggered landslide inventory maps using remote sensing and GIS technologies: Principles and case studies. *Geoscience Frontiers*, In. Press.
- Yang, X.; Chen, L. 2010. Using multi-temporal remote sensor imagery to detect earthquake-triggered landslides. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 12, 487-495.
- Zinck, J.A.; López, J.; Metternicht, G.I.; Shrestha, D.P.; Vásquez-Selem, L. 2001. Mapping and modelling mass movements and gullies in mountainous areas using remote sensing and GIS techniques. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 3, 43-53.