

SUSCETIBILIDADE A MOVIMENTOS DE MASSA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO TAQUARI/ANTAS¹

Francisco Monte Alverne de Sales Sampaio

Graduação em Engenharia Civil (Escola Politécnica), Mestre em Engenharia de Irrigação (UFPB)

Doutorando no Programa de Pós-Graduação em Geografia (UFSM)

E-mail: montealvernesampaio@gmail.com

Luís Eduardo de Souza Robaina

Graduação em Geologia (Unisinos), Mestre e Doutor em Geociências (UFRGS)

Professor e Orientador no Programa de Pós-Graduação em Geografia (UFSM)

E-mail: lesrobaina@yahoo.com.br

RESUMO

Movimentos de massa (MM) são processos naturais verificados quase que diariamente em diversas partes do mundo, causando perdas econômicas vultosas e, em muitos casos, ceifando vidas humanas. O mapeamento da suscetibilidade a movimentos de massa contribui de forma direta para o planejamento do uso e da ocupação do solo, controle da expansão urbana, avaliação de cenários potenciais de riscos e, ainda, no âmbito regional, auxilia na elaboração de zoneamentos ecológico-econômicos. Deste modo, este trabalho tem por objetivo o mapeamento das áreas suscetíveis a movimentos de massa na bacia hidrográfica do Rio Taquari-Antas (BHRTA), RS. A metodologia consistiu na aplicação do *Analytic Hierarchy Process* (Processo Analítico Hierárquico) - AHP, que baseia-se na estruturação de multicritérios de escolha a partir de uma abordagem hierárquica. Para isto, realizou-se a matriz de comparação pareada e o cruzamento de cinco atributos considerados decisivos para a determinação da suscetibilidade a movimentos de massa na BHRTA: i) Modelo Digital de Elevação (MDE); ii) Declividade; iii) Formas das Encostas; iv) Distância de Rodovias Federais e Estaduais, e v) Rios de Primeira Ordem. A partir da matriz de comparação pareada definiu-se que a declividade foi o atributo com maior peso no mapeamento da suscetibilidade a movimentos de massa na BHRTA (0,35), seguido do atributo forma das vertentes (0,27). O atributo distância dos rios de primeira ordem apresentou uma importância de 0,18 e os atributos distância das rodovias e MDE apresentaram uma importância de 0,10 cada. O cruzamento dos planos de informação mostrou que 23% da área total da bacia apresenta suscetibilidade baixa a movimentos de massa, enquanto que, a maior parte da área da bacia (49%) apresenta suscetibilidade média a movimentos de massa. As áreas com risco alto foram verificadas em 10% da área da bacia e 18% da BHRTA não apresentou risco. Assim, conclui-se que as áreas com maior suscetibilidade a movimentos de massa na BHRTA localizam-se nas áreas de encostas do alto e médio Taquari-Antas, e também nos seus afluentes, com destaque para os rios Forqueta e Guaporé.

PALAVRAS-CHAVE: Movimentos de Massa, Processo de Análise Hierárquica, Geoprocessamento, Rio Taquari-Antas.

SUSCEPTIBILITY TO LANDSLIDES IN THE TAQUARI/ANTAS RIVER BASIN

ABSTRACT

Landslides are natural processes that are verified almost daily in various parts of the world, causing major economic losses and, in many cases, harvesting human lives. The mapping of susceptibility to landslides contributes directly to the planning of land use and occupation, control of urban

¹ O presente trabalho faz parte da tese de doutoramento do primeiro autor.

expansion, evaluation of potential risk scenarios, and also, at the regional level, assists in the elaboration of ecological and economic zoning. Thus, this work has the objective of mapping the areas susceptible to landslides in the Taquari-Antas watershed, RS. The methodology consisted in the application of the Analytic Hierarchy Process - AHP, which is based on the structuring of multicriteria of choice from a hierarchical approach. For this, the paired comparison matrix and the crossing of five attributes considered decisive for the determination of the susceptibility to landslides in the Taquari-Antas watershed were performed: i) Digital Elevation Model (DEM); ii) Slope; iii) Hill forms; iv) Distance from Federal and State Highways, and v) Rivers of First Order. From the paired comparison matrix it was defined that the slope was the attribute with the greatest weight in the mapping of the susceptibility to landslides in the Taquari-Antas watershed (0.35), followed by hill forms (0.27). The distance attribute of the first order rivers presented an importance of 0.18 and the distance attributes of the highways and DEM presented an importance of 0.10 each. The crossing of the information plans showed that 23% of the total area of the basin presents low susceptibility to landslides, while most of the area of the basin (49%) presents medium susceptibility to landslides. Areas with high risk were verified in 10% of the area of the watershed and 18% of Taquari-Antas watershed did not present risk. Thus, it is concluded that the areas with the greatest susceptibility to landslides in the Taquari-Antas watershed are located in the upper and middle slope areas of Taquari-Antas, and also in its tributaries, especially the Forqueta and Guaporé rivers.

KEYWORDS: Landslides, Analytic Hierarchy Process, Geoprocessing, Taquari-Antas River.

INTRODUÇÃO

Movimentos de massa (MM) são processos naturais verificados quase que diariamente em diversas partes do mundo, causando perdas econômicas vultosas e, em muitos casos, ceifando vidas humanas (HUANG; ZHAO, 2018). Nas últimas décadas, o número de desastres naturais em várias partes do mundo vem aumentando consideravelmente em função do aumento da população, da ocupação desordenada, do intenso processo de urbanização e industrialização (KOBAYAMA *et al.*, 2006; ROBAINA *et al.*, 2010) e da ocorrência de precipitações intensas (PARIZZI *et al.*, 2010), que em escala regional podem estar relacionadas com as mudanças climáticas (ALVIOLI *et al.*, 2018).

Conforme os dados da EM-DAT (2018) houve um aumento de 550% no número de desastres naturais relatados no mundo entre 1970 a 2010. Froude e Petley (2018) salientam que apenas entre os anos de 2004 a 2016 ocorreram mais de 4.800 movimentos de massa, com um total de 55.997 mortes registradas. No Brasil, os dados do Atlas Brasileiro de Desastres Naturais (CEPED, 2013) mostram que entre 1991 a 2012 houve a ocorrência de 699 movimentos de massa, com aproximadamente cinco milhões e meio de pessoas diretamente afetadas e 535 mortes (CEPED, 2013).

No estado do Rio Grande do Sul, foram registrados seis desastres relacionados a movimentos de massa, caracterizados como deslizamentos de solo e ou rocha. Em relação aos danos

causados, foram registradas 3 mortes e 6.697 afetados de alguma forma por movimentos de massa entre 1991 a 2012 (CEPED, 2013).

Nas últimas décadas, as ferramentas de geoprocessamento tem possibilitado o desenvolvimento de métodos e técnicas capazes de trabalhar com dados complexos, integrar dados de diversas fontes e realizar análises de cunho espacial com a realização de mapas temáticos.

A avaliação e reconhecimento prévio das suscetibilidades de determinadas áreas à geração e desenvolvimento de fenômenos e processos do meio físico, cuja dinâmica pode ocasionar desastres naturais, é de grande importância aos municípios, contribuindo para o planejamento do uso e ocupação do solo, controle da expansão urbana, avaliação de cenários potenciais de riscos e, ainda, no âmbito regional, auxiliando na elaboração de zoneamentos ecológico-econômicos (BITAR, 2014).

Um dos principais métodos de avaliação e reconhecimento das áreas de suscetibilidades é através das cartas de suscetibilidade, as quais constituem-se em documentos cartográficos elaborados em atendimento à Política Nacional de Proteção e Defesa Civil, com vistas à prevenção de desastres naturais, tendo por foco a orientação do ordenamento territorial em municípios sujeitos a processos do meio físico como deslizamentos, corridas de massa, inundações e enxurradas (BITAR, 2014).

87

A suscetibilidade a movimentos de massa expressa a probabilidade de um deslizamento de terra ocorrer em uma área com base nas condições locais do terreno (BRABB, 1984). Riffel, Guasselli e Bressani (2016) salientam que o termo suscetibilidade está ligado apenas ao sistema natural, sem levar em consideração a ação antrópica, representando somente a fragilidade do ambiente.

Assim, no âmbito das geociências aplicadas, a definição do termo suscetibilidade pode ser sintetizada como a “predisposição ou propensão dos terrenos ao desenvolvimento de um fenômeno ou processo do meio físico” (BRASIL, 2007).

Diversas pesquisas têm sido desenvolvidas para o mapeamento da suscetibilidade a movimentos de massa (BRASIL, 2007; FERNANDES *et al.*, 2001; MARCELINO; NUNES; KOBAYAMA, 2006; VANACÔR; ROLIM, 2012), sendo estas utilizadas como a primeira medida preventiva a ser adotada para diminuir os efeitos destes fenômenos nas comunidades onde eles se verificam (BRASIL, 2007).

O mesmo é discutido por Guerra e Jorge (2013) e Morgan (2005), que salientam que diversas metodologias estão sendo desenvolvidas para o mapeamento e identificação das áreas

suscetíveis a movimentos de massa. Dentre estes métodos, destacam-se o *Shalstab* (DIETRICH *et al.*, 1998) e o *Analytic Hierarchy Process* (AHP) (SAATY, 1987). A aplicação da análise multicritério AHP em ambiente SIG (Sistema de Informações Geográficas) tem proporcionado inúmeros benefícios para análise de problemas e tomada de decisão no planejamento e gestão de áreas de risco a movimentos de massa (PINTO; PASSOS; CANEPARO, 2015).

Neste sentido, destacam-se os trabalhos de Vanacôr e Rolim (2012) que aplicaram a análise multicritério AHP para mapear a suscetibilidade a deslizamentos na região nordeste do Rio Grande do Sul; Shahabi e Hashim (2015) que utilizaram o método AHP para mapear áreas de risco a movimentos de massa em ambientes tropicais; Pinto, Passos e Caneparo (2015) que mapearam a suscetibilidade a movimentos de massa na bacia do rio Jacareí (PR); e Donassollo (2017) que mapeou a suscetibilidade a movimentos de massa em rodovias com o método AHP.

Deste modo, este trabalho tem por objetivo geral realizar um mapeamento da suscetibilidade a movimentos de massa na bacia hidrográfica do Rio Taquari/Antas BHRTA a partir de técnicas de geoprocessamento.

LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

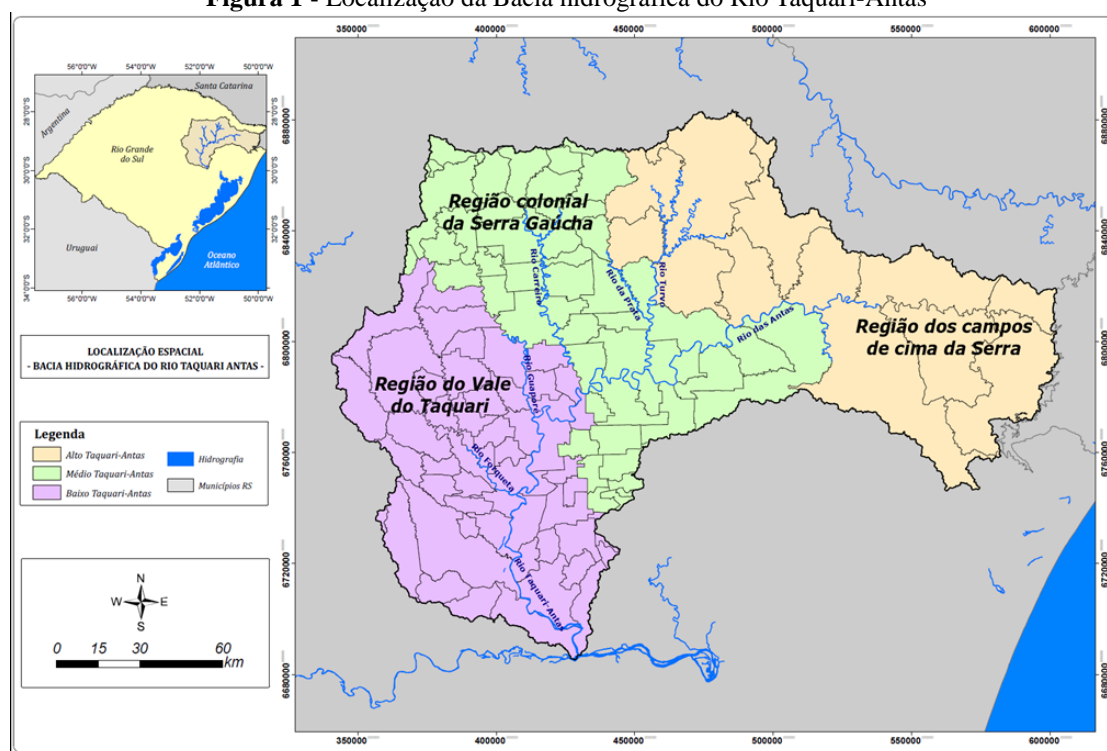
A BHRTA situa-se na região nordeste do estado do Rio Grande do Sul, entre as coordenadas geográficas 28°10' a 29°57' de latitude Sul e 49°56' a 52°38' de longitude Oeste, integrando a região hidrográfica do Atlântico Sudeste, conforme a classificação da Agência Nacional das Águas (ANA). As nascentes estão localizadas no município de São José dos Ausentes, no extremo leste do Planalto dos Campos Gerais. Nas proximidades do município de Bento Gonçalves, o rio das Antas recebe as águas do rio Carreiro e passa a se chamar rio Taquari. A BHRTA abrange total ou parcialmente 118 municípios e sete Unidades de Conservação, sendo duas administradas pelo estado e as demais pela União (RIO GRANDE DO SUL, 2013).

A BHRTA (Figura 1) possui área de 26.491,82 km², com população estimada de 1.207.640 habitantes (SEMA, 2012). De acordo com Gomez, Filho e Passuello (2017), a bacia é dividida em três regiões distintas em função das características topográficas, sendo elas:

- i) Região do Vale do Taquari ou Baixo Taquari-Antas: localizada nas altitudes inferiores da bacia, é formada por 39 municípios e destaca-se por seu potencial para o agronegócio e por sua parcela significativa no setor industrial de alimentos, onde é o responsável por 30% da produção de frangos, 15% da produção de suínos e 9% da produção leiteira estadual.

- ii) Região Colonial da Serra Gaúcha ou Médio Taquari-Antas: localizada nas altitudes intermediárias da bacia, com o predomínio de atividades industriais, principalmente após a década de 1940. Esta região é responsável por mais de 11% do PIB (Produto Interno Bruto) do estado, e destaca-se nos setores industriais do plástico e borracha, veículos automotores, mobiliário, material elétrico e vestuário, além também da vitivinicultura.
- iii) Região dos Campos de Cima da Serra ou Alto Taquari-Antas: é a região de maior altitude da bacia. A principal atividade econômica é a pecuária, favorecida pelas extensas áreas cobertas por campos limpos (campos de cima da Serra).

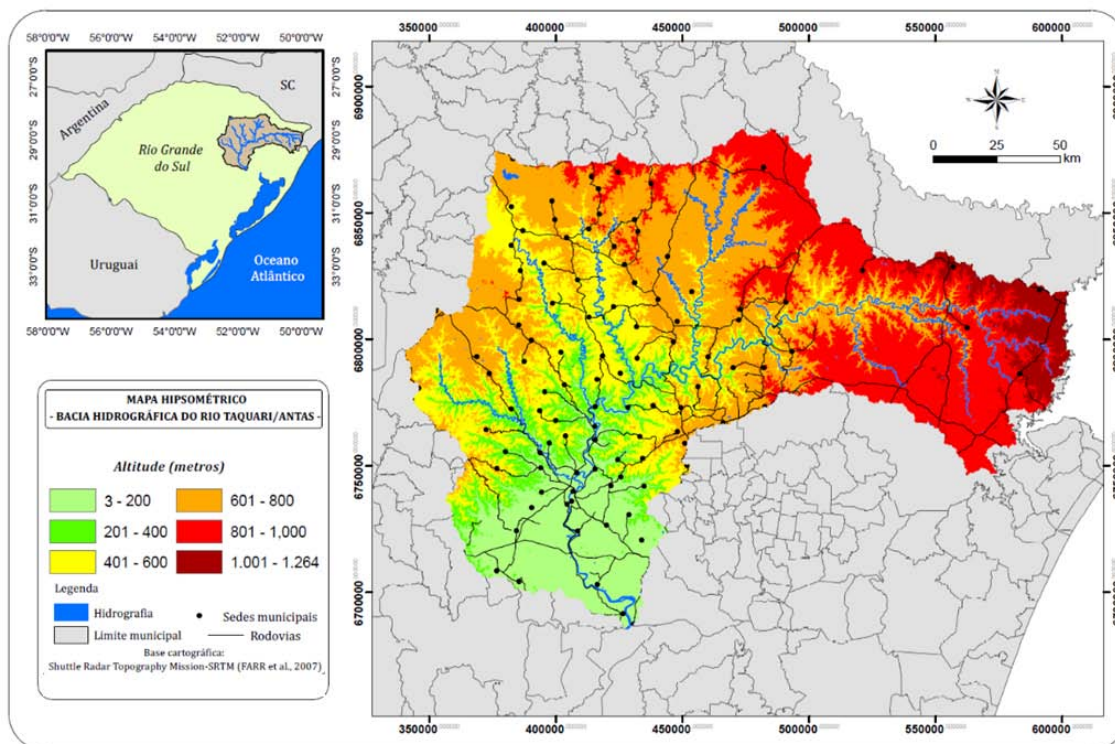
Figura 1 - Localização da Bacia hidrográfica do Rio Taquari-Antas



Fonte: Adaptado de Gomez, Filho e Passuello (2017)

A BHRTA apresenta uma amplitude altimétrica de 1.261 metros (Figura 2). Scopel, Teixeira e Binotto (2005) salientam que, nas nascentes do alto Taquari-Antas, as altitudes são de até 1.264 metros, enquanto que, no baixo Taquari-Antas, as altitudes são de 3 metros. O relevo apresenta formas bastante abruptas, com desníveis médios de 400 metros, possuindo muitos topos de morros angular ou estreito (OLIVEIRA *et al.*, 2013).

Figura 2 - Localização e altimetria da bacia hidrográfica do rio Taquari-Antas.

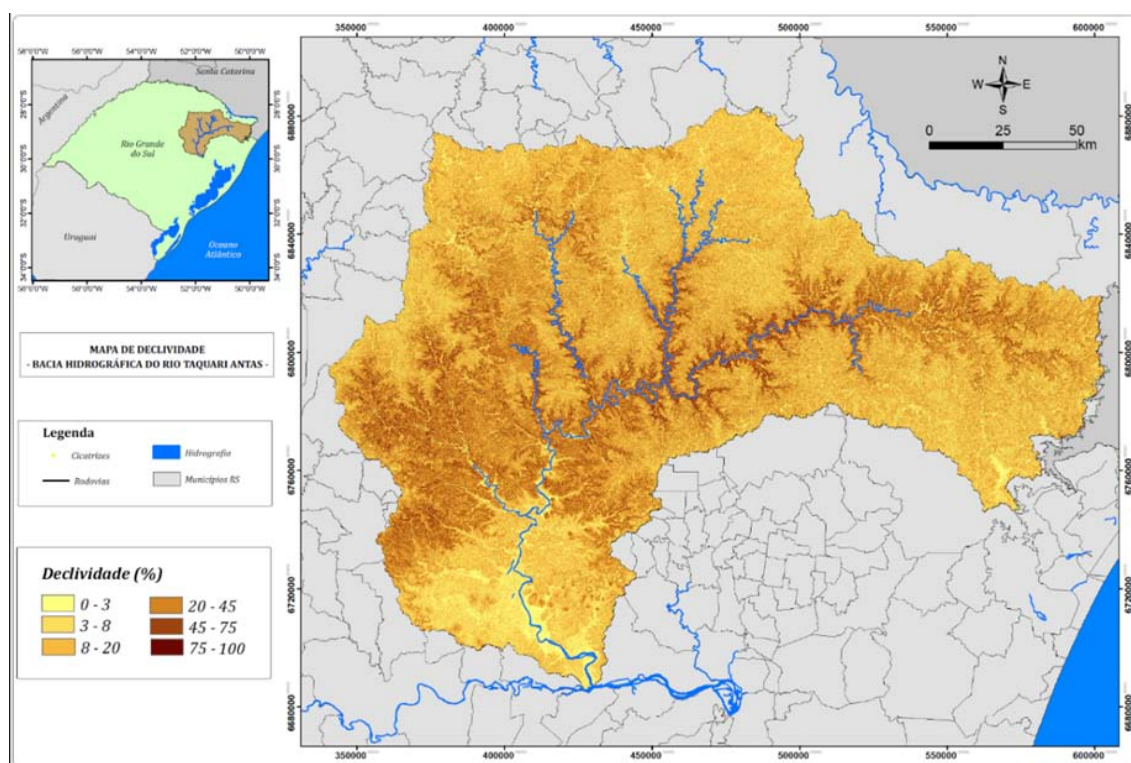


Fonte: elaborado pelos autores.

A declividade da BHRTA apresenta valores que variam entre 0 a 100%, ou seja, de plano a escarpado (Figura 3). Conforme a FEPAM (2015), o rio Taquari-Antas caracteriza-se por possuir declividade acentuada, com afluentes encaixados e muitas corredeiras, principalmente nos trechos médio e alto.

Conforme a classificação da EMBRAPA (1979), a maior parte da BHRTA apresenta um relevo variando entre ondulado a forte ondulado. As áreas com relevo escarpado são vistas nos vales dos rios Taquari-Antas, Fão e Carreiro. Já as áreas com relevo plano restringem-se às áreas a jusante do rio Taquari-Antas.

Figura 3 - Mapa de Declividade da BHRTA.



Fonte: elaborado pelo autores

PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Aquisição dos dados

Para a realização deste trabalho, optou-se por trabalhar com quatro elementos do terreno: Modelo Digital de Elevação (MDE), Declividade, Formas das Encostas e rios de primeira ordem; e um elemento antrópico: distância das rodovias Estaduais e Federais. O MDE utilizado neste trabalho foi o *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) versão GL1 (RODRÍGUEZ; MORRIS; BELZ, 2006), obtido na plataforma *Global Data Explorer* (<https://gdex.cr.usgs.gov/gdex/>), disponibilizados pelo *United States Geological Survey* (USGS) em parceria com a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA). O SRTM GL1 foi derivado do SRTM v3.0, e apresenta resolução espacial de 1 arco de segundo (aproximadamente 30 metros) (FARR *et al.*, 2007). O SRTM GL1 foi publicado em 2015 e tem como principal característica o preenchimento de falhas, a partir da interpolação com os dados do MDE Aster 30 metros.

As imagens SRTM GL1 estão disponíveis em grades de 1 x 1°. Para cobrir integralmente a área de estudo foram necessárias à obtenção de seis imagens. Após a aquisição das imagens, realizou-se a mosaicagem no *software* ArcGIS 10.5 e por conseguinte a confecção dos mapas de

declividade e forma das encostas. O mapa de forma das encostas foi gerado com base nas informações de curvatura vertical e horizontal.

Além dos atributos do terreno, trabalhou-se também com a distância dos rios de primeira ordem. Optou-se por trabalhar com os rios de primeira ordem, pois, eles representam uma estreita faixa fluvial que ocorre em uma parte da paisagem dominada por processos de encostas. A proximidade das encostas (particularmente íngremes) a uma rede de canais de corrente relativamente densa cria uma zona na qual os materiais de encostas podem ser prontamente transferidos para a rede de canais (O'CONNOR; PERRY; MCDAVITT, 2007). Os rios de primeira ordem foram obtidos no site da Secretária Estadual de Meio Ambiente (SEMA), em escala de 1:25.000. Após a aquisição dos dados dos rios de primeira ordem, calculou-se a distância euclidiana, com um *buffer* de até 300 metros.

O arquivo vetorial contendo as rodovias Federais e Estaduais foram obtidas no site do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) (<http://www.dnit.gov.br/mapas-multimodais/shapefiles>). Após a aquisição do arquivo vetorial, realizou-se o cálculo da distância euclidiana das rodovias, em um *buffer* de até 2.000 metros.

Mapeamento da suscetibilidade

Para a realização do mapeamento da suscetibilidade a movimentos de massa utilizou-se o método AHP (SAATY, 1987). O AHP é uma teoria geral de medição, utilizada para derivar escalas de razão de comparações pareadas discretas e contínuas. Essas comparações podem ser obtidas de medições reais ou de uma escala fundamental que reflete a força relativa de experiências e intuições (SAATY, 1987). O benefício do AHP é que, como os valores dos julgamentos das comparações paritárias são baseados em experiência, intuição e também em dados físicos, o AHP permite lidar com aspectos qualitativos e quantitativos em um problema de decisão.

Para esta pesquisa, foram definidos cinco fatores para caracterização das áreas suscetíveis a movimentos de massa:

- i) Modelo Digital de Elevação;
- ii) Declividade;
- iii) Formas das Encostas;
- iv) Rodovias Federais e Estaduais, e
- v) Rios de Primeira Ordem.

Para determinação dos pesos de cada um dos cinco fatores, utilizou-se a lógica da comparação pareada. O AHP é uma aproximação para tomada de decisão que envolve estruturação de multicritérios de escolha numa hierarquia. O método avalia a importância relativa desses critérios, compara alternativas para cada critério, e determina um *ranking* total das alternativas.

Dentro dos princípios do método, foi montada uma matriz quadrada com base na comparação pareada. Os fatores foram comparados com eles mesmos e cada julgamento representa a dominância de um fator da coluna sobre um fator na linha.

A definição da importância relativa de cada um dos fatores baseou-se na escala fundamental de números absolutos também conhecida por escala fundamental de Saaty (SAATY, 1991) (Tabela 1). A escala fundamental de Saaty abrange valores de 1 a 9, com 1 significando a mesma importância de um critério em relação ao outro, e 9 significando a extrema superioridade na importância de um critério sobre outro, com estágios intermediários de importância entre os níveis 1 e 9.

Tabela 1 - Escala fundamental de Saaty para definição da importância relativa dos fatores

Intensidade de importância	Definição e explicação
1	Importância igual - os dois fatores contribuem igualmente
3	Importância moderada - um fator é ligeiramente mais importante que o outro
5	Importância essencial - um fator é claramente mais importante que o outro
7	Importância demonstrada - um fator é fortemente favorecido e sua maior relevância foi demonstrada na prática
9	Importância extrema - evidência que diferencia os fatores é a de maior ordem possível
2, 4, 6, 8	Valores intermediários entre julgamentos - possibilidade de compromissos adicionais

Fonte: adaptado de Saaty (1991).

A definição dos pesos na escala de Saaty (1991) reflete as respostas de duas perguntas: 1) qual dos dois elementos é mais importante? e, 2) com base na escala de 1-9, que intensidade um critério é mais importante que outro?

A relação da importância relativa entre os fatores obtida com a escala fundamental de Saaty foi utilizada como dado de entrada da matriz de comparação pareada, onde foram calculados os

valores da matriz. Os pesos são obtidos por meio do autovetor principal da matriz de comparação pareada, Tabela 2.

Tabela 2 - Matriz de comparação pareada dos atributos

Fatores	Dec	Vert	Rod	Rios	MDE
Dec	1/1	1/1	3/1	3/1	9/1
Vert	1/1	1/1	3/1	3/1	3/1
Rod	1/3	1/3	1/1	1/1	2/1
Rios	3/1	1/3	1/1	1/1	1/2
MDE	1/9	1/3	1/2	2/1	1/1

Fonte: elaborado pelo autores

Após a definição dos valores da matriz de comparação pareada, realizou-se o cálculo do peso relativo dos julgamentos com respeito aos fatores (Tabela 3). Os pesos relativos são obtidos por meio da aplicação de um processo de duas etapas. Primeiramente, soma-se cada coluna e, então divide-se cada julgamento de entrada pela soma respectiva da coluna.

Assim, definiu-se que a declividade foi o fator condicionante com maior influência nos movimentos de massa (0,35), seguido do fator forma das encostas (0,27). O fator distância dos rios de primeira ordem apresentou uma importância de 0,18 e os fatores distância das rodovias e MDE apresentaram uma importância de 0,10 cada.

Tabela 3 – Valores dos pesos dos fatores na matriz de comparação pareada

Fatores	Dec	Vert	Rod	Rios	MDE	Influência
Dec	1	1	3	3	9	0,35
Vert	1	1	3	3	3	0,27
Rod	0,3	0,3	1	1	2	0,10
Rios	3	0,3	1	1	0,5	0,18
MDE	0,1	0,3	0,5	2	1	0,10

Fonte: elaborado pelo autores

Além dos pesos dos fatores, foi possível também o cálculo dos pesos das classes dos fatores, a partir de trabalho de Santos (2015), que realizou um inventário dos movimento de massas em

Marques de Souza, município localizado dentro da BHRTA. Santos (2015) identificou no médio/baixo curso do Rio Taquari-Antas 142 cicatrizes de movimentos de massa.

Para isto, inseriu-se no *software* ArcGIS 10.4 os *shapefiles* correspondentes aos 142 pontos de cicatrizes inventariadas por Santos (2015). Após inserir os pontos das cicatrizes, extraíram-se os valores de cada um dos cinco fatores analisados: declividade, forma das encostas, distância das rodovias, distância dos rios de primeira ordem e MDE, referentes a cada uma das 142 cicatrizes.

O cálculo dos pesos de cada classe deu-se com base na densidade de deslizamentos ocorridos dentro da área de cada classe em relação à densidade de deslizamentos ocorridos na área inteira mapeada por Santos (2015) (142 cicatrizes), conforme a Equação 1.

$$W_{vn} = L_{vn}/L \quad (1)$$

Onde,

W_{vn} é o peso da variável n ;

L_{vn} é o número de ocorrências de deslizamentos envolvendo a variável n ;

L é o número de ocorrência de deslizamentos na área.

A Tabela 4 mostra os pesos calculados para cada classe. Após o cálculo dos pesos de cada classe, verificou-se que os valores de declividade entre 45 a 75% apresentam a maior suscetibilidade a MM para este fator, 0,479.

Para a distância das rodovias, conforme o trabalho de Santos (2015), a distância que apresentou as maiores ocorrências de movimentos de massa foi entre 50 a 100 metros, com um peso final de 0,577. Em relação à distância dos movimentos de massa para os rios de primeira ordem, verificou-se que a grande maioria dos movimentos de massa mapeados por Santos (2015) encontram-se entre 0 e 10 metros do rio de primeira ordem, obtendo um peso de 0,444 para este fator.

Para o MDE, verificou-se que a maioria das cicatrizes mapeadas por Santos (2015) estão localizadas entre 400 a 500 metros de altitude. Com isto, esta classe recebeu o maior peso, 0,768, no fator MDE.

Por fim, a forma das encostas em que ocorreu o maior número de cicatrizes foi na classe Convergente/Convexa, com peso de 0,44 para esta classe. Destaca-se também, no fator forma das encostas, a classe Divergente/Convexa, que apresentou um peso de 0,30.

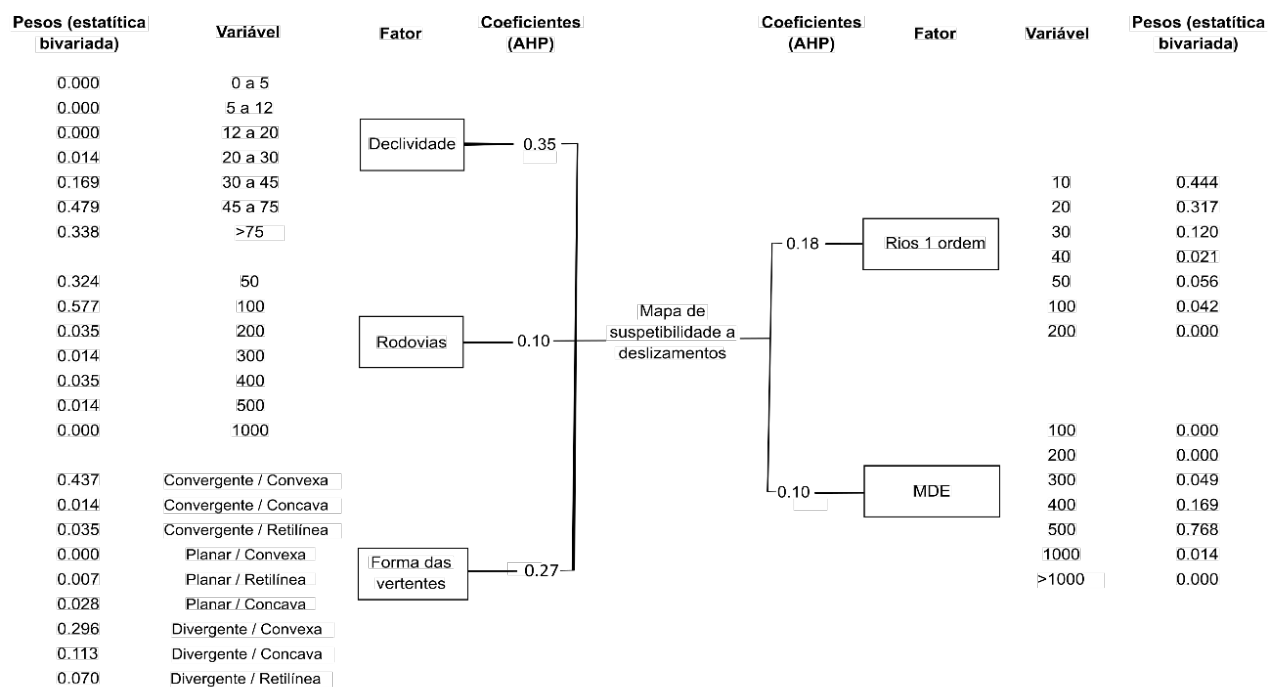
Tabela 4 - Pesos das classes de cada fator para as 142 cicatrizes.

Fator	Classe	Nº ocorrências	Peso
Declividade (%)	0 a 5	0	0,000
	5 a 12	0	0,000
	12 a 20	0	0,000
	20 a 30	2	0,014
	30 a 45	24	0,169
	45 a 75	68	0,479
	>75	48	0,338
Rodovias (metro)	0 a 50	46	0,324
	50 a 100	82	0,577
	100 a 200	5	0,035
	200 a 300	2	0,014
	300 a 400	5	0,035
	400 a 500	2	0,014
	>1000	0	0,000
Rios 1 ordem (metro)	0 a 10	63	0,444
	10 a 20	45	0,317
	20 a 30	17	0,120
	30 a 40	3	0,021
	40 a 50	8	0,056
	50 a 100	6	0,042
	>200	0	0,000
MDE(altitude) (metro)	0 a 100	0	0,000
	100 a 200	0	0,000
	200 a 300	7	0,049
	300 a 400	24	0,169
	400 a 500	109	0,768
	500 a 1000	2	0,014
	>1000	0	0,000
Forma das encostas: curvatura horizontal - vertical	Convergente / Convexa	62	0,44
	Convergente / Côncava	2	0,01
	Convergente / Retilínea	5	0,04
	Planar / Convexa	0	0,00
	Planar / Retilínea	1	0,01
	Planar / Côncava	4	0,03
	Divergente / Convexa	42	0,30
	Divergente / Côncava	16	0,11
	Divergente / Retilínea	10	0,07

Fonte: adaptado de Santos (2015). Elaboração: os autores

A Figura 4 mostra a estruturação dos níveis compostos para avaliação por critérios múltiplos e combinação linear ponderada. Vê-se que o fator que apresentou maior peso foi a declividade (0,35), seguido da forma das encostas (0,27), rios de primeira ordem (0,18), MDE (0,10) e rodovias (0,10).

Figura 4 - Estruturação dos níveis compostos para avaliação por critérios múltiplos e combinação linear ponderada



Fonte: elaborado pelo autores

Após a definição dos pesos dos fatores e das classes, realizou-se, no *software* ArcGIS 10.4, duas reclassificações para cada fator. Primeiramente, substituiu-se os valores de cada classe para os valores dos pesos calculados anteriormente.

A segunda reclassificação teve por objetivo acrescentar ao *raster* o valor do risco referente ao coeficiente AHP, variando de 1 a 7, sendo que os valores próximos a 1 representam risco baixo e valores próximos a 7 risco alto (Tabela 5).

Tabela 5 - Valores dos *rasters* em relação ao risco

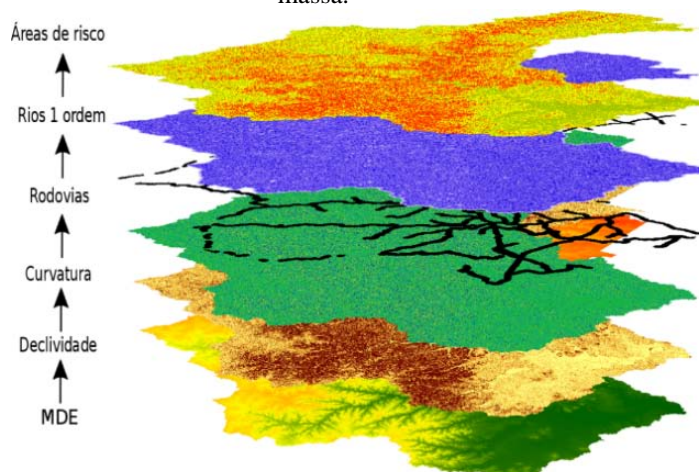
Risco Baixo	Risco Médio	Risco Alto
-------------	-------------	------------

Atributo do terreno	1	2	3	4	5	6	7
Distância dos rios de 1 ordem (m)	0	0,021	0,042	0,056	0,120	0,317	0,444
Distância de rodovias (m)	0	0,014	0,014	0,035	0,035	0,324	0,577
Forma das encostas	0	0,01	0,01	0,03	0,04	0,30	0,44
Declividade (%)	0	0	0	0,014	0,169	0,338	0,479
MDE (m)	0	0	0	0,014	0,049	0,169	0,768

Fonte: elaborado pelo autores

Por fim, realizou-se a sobreposição dos fatores com seus respectivos coeficientes AHP, gerando um mapa de risco com os valores de 1 a 7 (Figura 5). Definiu-se que os valores entre 1 a 3 apresentariam risco baixo, os valores de 4 a 5 risco médio e 6 a 7 risco alto.

Figura 5 - Sobreposição dos planos de informação utilizados para mapeamento das áreas suscetíveis à movimentos de massa.



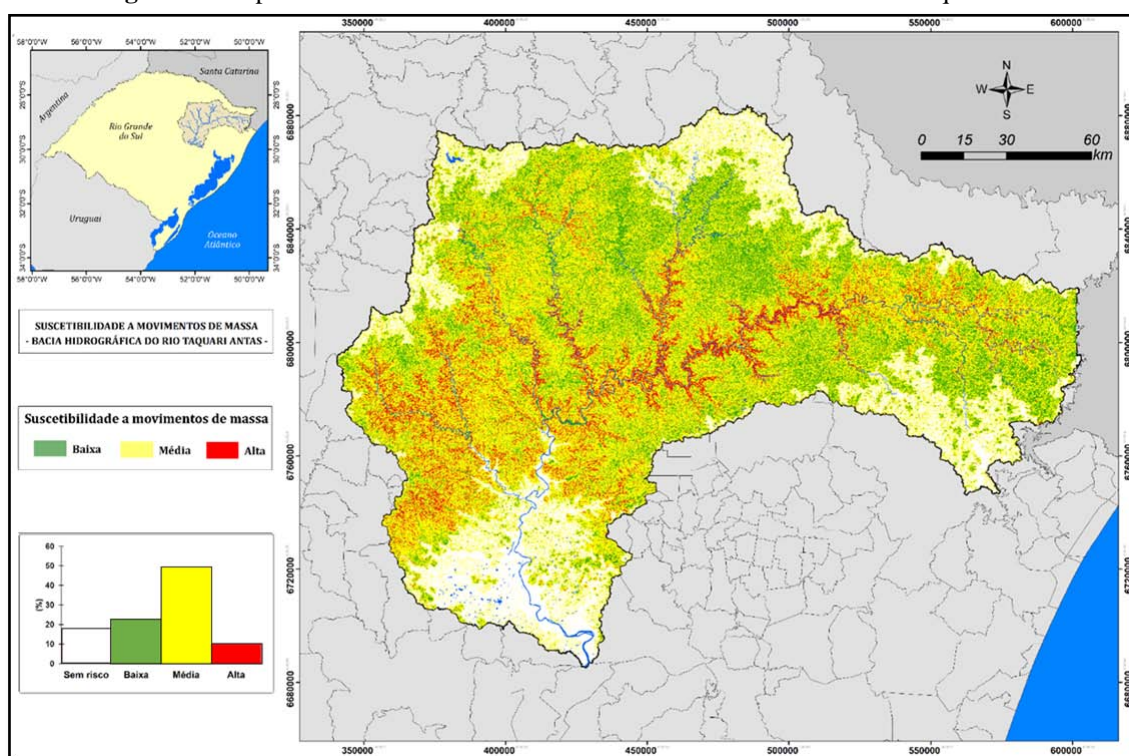
Fonte: elaborado pelo autores

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir da sobreposição dos mapas de MDE, declividade, forma das encostas, rodovias federais e estaduais, e rios de primeira ordem, com seus respectivos pesos e valores (de 1 a 7), gerou-se o mapa de suscetibilidade a movimentos de massa (Figura 6). O cruzamento dos planos de informação mostrou que 23% da área total da bacia apresenta suscetibilidade baixa a movimentos de massa. No geral, estas áreas são planas ou com relevo suave, indicando baixa ou muito baixa probabilidade de ocorrência de movimentos de massa, não oferecendo perigo ao uso e ocupação do solo. Estas áreas apresentam pouquíssimas restrições com relação à realização de corte ou aterro, ou

mesmo fundações. Os problemas originados nesses locais provêm de cortes mal dimensionados ou barramentos excessivos, resultando em erosão ou aumento inadequado da declividade do terreno (FLORES, 2018). As áreas com suscetibilidade baixa estão localizadas, principalmente, nos locais com menores declividades, como, por exemplo, a jusante do rio Taquari/Antas.

Figura 6 - Mapa de suscetibilidade a movimentos de massa na bacia do rio Taquari/Antas



Fonte: elaborado pelo autores

A maior parte da área da bacia (49%) apresenta suscetibilidade média a movimentos de massa. A suscetibilidade média refere-se a áreas onde as condições do terreno já indicam um grau mediano para a ocorrência de movimentos de massa. Ainda que não se tenha registro de ocorrência desse tipo de fenômeno, a utilização destas áreas pelo homem deve considerar soluções técnicas e medidas de proteção para evitar possíveis riscos (FLORES, 2018). As áreas com suscetibilidade média localizam-se em sua maioria na porção norte da bacia.

As áreas com risco alto foram verificadas em 10% da área da bacia. Em geral estas áreas são impróprias para atividades humanas, onde os terrenos, de forma natural, são extremamente favoráveis à ocorrência de movimentos de massa. Normalmente possuem altíssima declividade, onde nem grandes obras de engenharia garantem a eliminação dos riscos. A utilização destas áreas

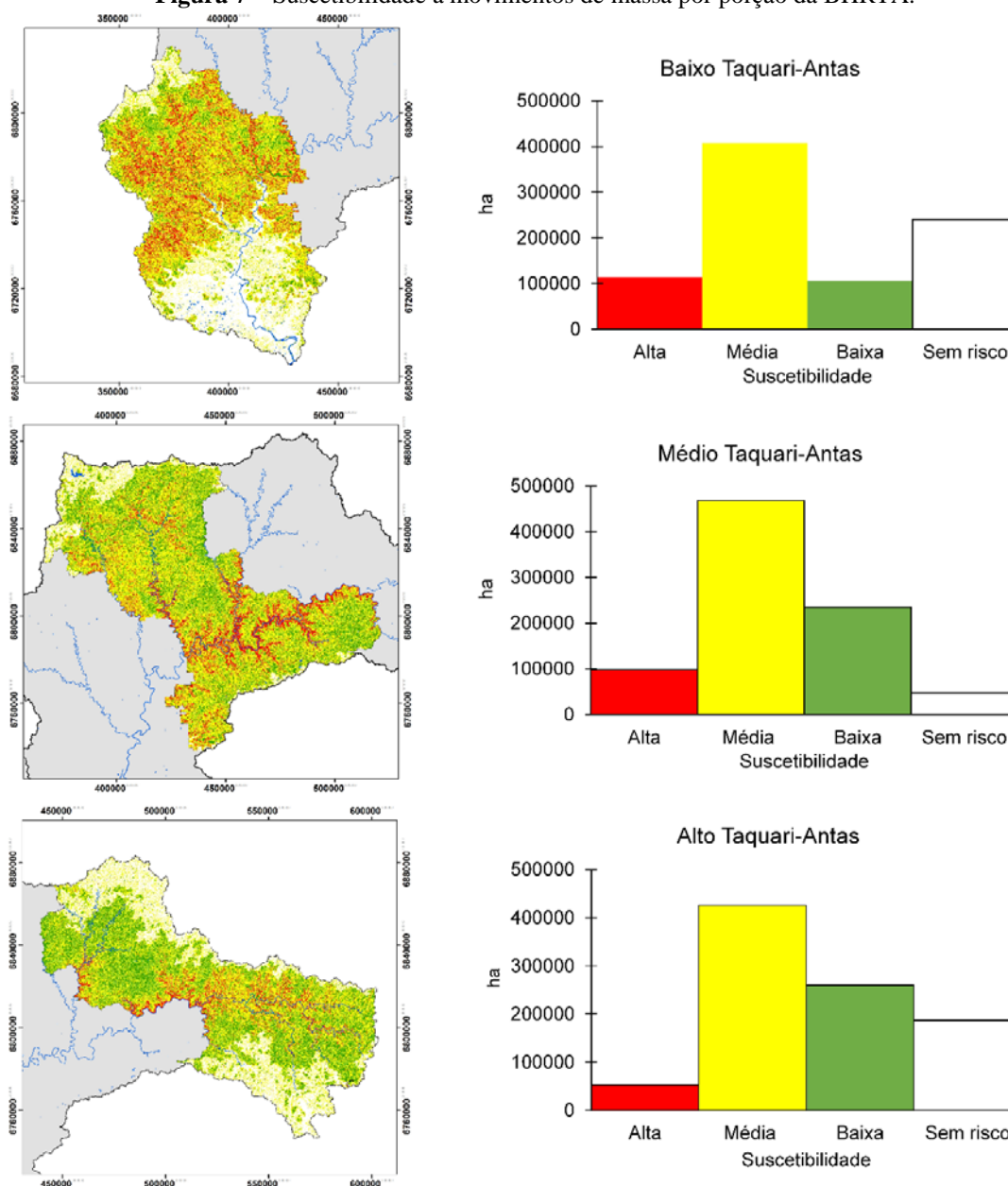
só é justificada quando se tem a necessidade de implantação de obras de transposição tais como rodovias, linhas de transmissão, entre outros, e tem-se a necessidade da implantação de medidas de prevenção e mitigação contra riscos e acidentes. Estas áreas localizam-se próximas ao curso médio/alto do rio Taquari/Antas, em áreas com maiores declividades e com variação de amplitude da elevação.

Ao realizar um estudo sobre a identificação das áreas suscetíveis a fluxos de detritos na BHRTA, Oliveira *et al.* (2018) verificaram que na bacia ocorrem processos hidrológicos extremos e distintos: no vale do Rio Taquari predominam as inundações, em virtude da grande dimensão da bacia e do elevado tempo de concentração das águas, e nas bacias menores, referentes aos afluentes do Rio Taquari, predominam os movimentos de massa e as enxurradas, dada a presença de linhas de escarpa erosivas com declividades acentuadas e vales com rios bem encaixados.

A Figura 7 mostra o mapeamento da suscetibilidade a movimentos de massa por regiões da BHRTA. A porção compreendida pelo baixo Taquari-Antas foi a que apresentou maior área classificada como de suscetibilidade alta a MM, >10.000 ha. Esta área é marcada pelo relevo de formas abruptas, entre o baixo e médio Taquari-Antas. Além disto, devido à pouca variação da declividade na parte a jusante do rio Taquari-Antas, a porção do baixo Taquari-Antas apresentou a maior ocorrência de áreas classificadas como sem risco.

Já a área compreendida pelo médio Taquari-Antas apresentou a maior ocorrência de risco médio a movimentos de massa. As áreas classificadas como risco médio foram maiores que 48.000 ha. O mesmo é verificado na área compreendida pelo Alto Taquari-Antas, onde a classe de risco médio foi também a que apresentou maior área, aproximadamente 44.000 ha.

Figura 7 – Suscetibilidade a movimentos de massa por porção da BHRTA.



Fonte: elaborado pelo autores

CONCLUSÕES

Tendo em vista os objetivos gerais deste estudo de mapeamento das áreas suscetíveis a movimentos de massa na BHRTA, chegou-se as seguintes conclusões:

O mapeamento das áreas de risco mostrou que 10% da área da BHRTA apresenta suscetibilidade alta a movimentos de massa. Estas áreas concentram-se basicamente próximas ao leito do rio Taquari/Antas e seus afluentes, principalmente o Arroio Jacaré, rio Carreiro, rio Fão e rio Turvo. Recomenda-se a não ocupação destes locais, dada a possibilidade de ocorrência de

movimentos de massa. Caso haja ocupação humana nestes locais, sugere-se um monitoramento constante por parte da defesa civil, uma vez que os movimentos de massa, além de perdas materiais, podem ceifar vidas humanas.

A maior parte da bacia, 49%, apresenta risco médio a movimentos de massa. As áreas com risco médio podem ou não apresentar movimentos de massa, entretanto, a utilização destas áreas deve se dar de modo cautelar ou com a execução de medidas de prevenção a possíveis riscos. Deve-se manter em constante monitoramento áreas com a presença de cortes e aterros e construções próximas a taludes. Por fim, 23% da área da bacia apresentam baixo risco à ocorrência de movimentos de massa e 18% não apresentam risco a movimentos de massa.

Além disto, o método AHP mostrou-se altamente recomendável para mapeamento da suscetibilidade a movimentos de massa. Neste trabalho, verificou-se que 93,9% das cicatrizes inventariadas por Santos (2015) foram classificadas como de alta suscetibilidade a movimentos de massa pelo método AHP. Em trabalhos futuros, recomenda-se utilizar, além do AHP, outros métodos, como, por exemplo, o mapa de uso e cobertura da terra, precipitação, solos e geologia, de modo a melhorar ainda mais a precisão do mapeamento final.

REFERÊNCIAS

- ALVIOLI, M. *et al.* Implications of climate change on landslide hazard in Central Italy. **Science of The Total Environment**, [s. l.], v. 630, p. 1528–1543, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969718307150>. Acesso em: 23 mai. 2019.
- BITAR, O. Y. **Cartas de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundações**. Brasília, 2014.
- BRABB, E. Innovative Approaches for Landslide Hazard Evaluation. In: Iv International Symposium on Landslides 1984, Toronto. **Anais...** Toronto, 1984.
- BRASIL. **Mapeamento de riscos em encostas e margens de rios** Ministério das Cidades, Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT. Brasília. 2011. Disponível em: <http://www.cidades.gov.br/acessibilidade-e-programas-urbanos/acoes-e-programas-snapu/prevencao-de-riscos/136-secretaria-nacional-de-programas-urbanos/prevencao-e-erradicacao-de-riscos/1855-material-basico-para-o-mapeamento-e-gerenciamento-de-areas-de-risc>. Acesso em: 22 mai. 2019.
- CEPED. **Atlas brasileiro de desastres naturais: 1991 a 2012**. 2. ed. Florianópolis: CEPED UFSC, 2013. Disponível em: <https://s2id.mi.gov.br/paginas/atlas/>. Acesso em: 23 mai. 2019.
- DIETRICH, W. E. *et al.* **A validation study of the shallow slope stability model, SHALSTAB, in forested lands of Northern California**. [s.l.: s.n.]. 1998. Disponível em:

http://www.krisweb.com/krisrussian/krisdb/html/krisweb/biblio/gen_ucb_dietrichetal_1998_shalsta b.pdf. Acesso em: 6 mar. 2019.

DONASSOLLO, A. **Movimentos de massa em rodovias utilizando o método Analytic Hierarchy Process (AHP). Estudo de caso : Rodovia rs-115 , Taquara – Gramado , RS .** 2017. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

EM-DAT. **The international disasters database.** 2018. Disponível em: <https://www.emdat.be/index.php>. Acesso em: 23 maio. 2019.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sumula da X reunião técnica de levantamento de solos.** Rio de Janeiro. 1979.

FARR, T. G. *et al.* The Shuttle Radar Topography Mission. **Reviews of Geophysics**, [s. l.], v. 45, n. 2, p. RG2004, 2007. Disponível em: <http://doi.wiley.com/10.1029/2005RG000183>. Acesso em: 11 jun. 2019.

FEPAM. **Rio Taquari-Antas.** 2015. Disponível em: <http://www.fepam.rs.gov.br/qualidade/taquariantas.asp>. Acesso em: 9 maio. 2018.

FERNANDES, N. F. *et al.* Condicionantes Geomorfológicos dos Deslizamentos nas Encostas : Avaliação de Metodologias e Aplicação de Modelo de Previsão de Áreas Suscetíveis. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, [s. l.], v. 2, n. 1, p. 51–71, 2001. Disponível em: <http://www.lsie.unb.br/rbg/index.php/rbg/article/view/8>. Acesso em: 17 mai. 2018.

FLORES, T. **Modelagem e análise das áreas suscetíveis a movimentos de massa na bacia do rio Fão, a partir de redes neurais artificiais.** 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) - Centro Universitário Univates, Lajeado, 2018.

FROUDE, M. J.; PETLEY, D. N. Global fatal landslide occurrence from 2004 to 2016. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, [s. l.], v. 18, n. 8, p. 2161–2181, 2018.

GOMEZ, S. T. R.; FILHO, L. C. P. da S.; PASSUELLO, A. C. Estimativa das cargas de efluentes industriais na bacia hidrográfica Taquari-Antas. **Boletim Geográfico do Rio Grande do Sul**, [s. l.], n. 29, p. 94–117, 2017.

GUERRA, A. J. T.; JORGE, M. do C. O. **Processos erosivos e recuperação de áreas degradadas.** São Paulo: Bertrand, 2013.

HUANG, Y.; ZHAO, L. Review on landslide susceptibility mapping using support vector machines. **Catena**, [s. l.], v. 165, n. March, p. 520–529, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.03.003>. Acesso em: 9 maio. 2018.

KOBIYAMA, M. *et al.* **Prevenção de desastres naturais: conceitos básicos.** Ed. Organi ed. Curitiba. 2010. Disponível em: http://www.labclima.ufsc.br/files/2010/04/Livro_Prevencao_de_Desastres_Naturais.pdf. Acesso em: 22 mai. 2019.

MARCELINO, E. V.; NUNES, L. H.; KOBAYAMA, M. Mapeamento De Risco De Desastres Naturais Do Estado De Santa Catarina. **Caminhos de Geografia**, [s. l.], v. 7, n. 17, p. 72–84, 2006. Disponível em: <http://www.seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/article/view/15273/8574> Acesso em: 22 mai. 2019.

MORGAN, R. P. C. **Erosion and Conservation**. 3. ed. Oxford: Blackwell Publishing, 2005.

O'CONNOR, M.; PERRY, C.; MCDAVITT, W. **Sediment Yield From First-Order Streams in Managed Redwood Forests: Effects of Recent Harvests and Legacy Management Practices** 1. Delaware. 2007. Disponível em: <https://pdfs.semanticscholar.org/eff1/87289cb3d4f94a5abda7281e19d7ea1b930a.pdf>. Acesso em: 11 jun. 2019.

OLIVEIRA, G. G. *et al.* Identificação e análise de áreas suscetíveis a fluxos de detritos na bacia hidrográfica do Rio Taquari-Antas, RS. **Pesquisas em Geociências**, [s. l.], v. 45, p. 1–25, 2018.

OLIVEIRA, G. G. *et al.* Interpretação e mapeamento geomorfológico da bacia hidrográfica do rio Taquari- Antas, com suporte de técnicas de geoprocessamento e utilização de dados orbitais e cartográficos. In: (INPE, Ed.) ANAIS XVII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO 2013, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu, 2013. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/sbsr2015/files/p1404.pdf>. Acesso em: 14 mai. 2018.

PARIZZI, M. G. *et al.* Correlações entre chuvas e movimentos de massa no município de Belo Horizonte, MG. **Geografias**, [s. l.], v. 06, n. 2, p. 49–68, 2010.

PINTO, R.; PASSOS, E.; CANEPARO, S. Mapeamento de suscetibilidade aos movimentos de massa com uso da Avaliação Multicritério pelo método da Média Ponderada Ordenada / Mapping of susceptibility to mass movements using the - DOI 10.5752/P.2318-2962.2015v25n43p116. **Caderno de Geografia**, [s. l.], v. 25, n. 43, p. 116–143, 2015. Disponível em: <http://periodicos.pucminas.br/index.php/geografia/article/view/8276>. Acesso em: 22 mai. 2019.

RIFFEL, E. S.; GUASSELLI, L. A.; BRESSANI, L. A. Desastres associados a movimentos de massa: Uma revisão de literatura. **Bol. Goia. Geogr. (Online)**, [s. l.], v. 36, n. 2, p. 285–306, 2016. Disponível em: <https://revistas.ufg.br/bgg/article/viewFile/42796/21417>. Acesso em: 22 mai. 2019.

RIO GRANDE DO SUL. **Bacia Hidrográfica do Rio Taquari-Antas**. 2013. Disponível em: <http://www.sema.rs.gov.br/g040-bacia-hidrografica-do-rio-taquari-antas>. Acesso em: 9 maio. 2018.

ROBAINA, L. E. D. S. *et al.* Análise espaço-temporal das ocorrências de inundações e movimentos de massa no município de Caxias do Sul , RS. **Ciência e Natura**, [s. l.], v. 32, n. 1, p. 159–172, 2010.

RODRÍGUEZ, E.; MORRIS, C. S.; BELZ, J. E. A Global Assessment of the SRTM Performance. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, [s. l.], v. 72, n. 3, p. 249–260, 2006. Disponível em: <http://openurl.ingenta.com/content/xref?genre=article&issn=0099-1112&volume=72&issue=3&page=249>. Acesso em: 11 jun. 2019.

SAATY, R. W. The analytic hierarchy process—what it is and how it is used. **Mathematical Modelling**, [s. l.], v. 9, n. 3–5, p. 161–176, 1987. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0270025587904738>. Acesso em: 17 mai. 2018.

SAATY, T. **Método de Análise Hierárquica**. Rio de Janeiro: Makron books, 1991.

SANTOS, D. M. **Zoneamento das áreas suscetíveis a movimentos de massa, enxurradas e inundações no município de Marques de Souza, RS**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) - Centro Universitário Univates, Lajeado, 2015. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/51328839.pdf>. Acesso em: 22 mai. 2019.

SCOPEL, R. M.; TEIXEIRA, E. C.; BINOTTO, R. B. Caracterização hidrogeoquímica de água subterrânea em área de influência de futuras instalações de usinas hidrelétricas: bacia hidrográfica do rio Taquari-Antas/RS, Brasil. **Química Nova**, [s. l.], v. 28, n. 3, p. 383–392, 2005. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422005000300004&lng=pt&nrm=iso&tlng=pt>. Acesso em: 14 maio. 2018.

SEMA - Secretaria Estadual de Meio Ambiente do Rio Grande do Sul. **Bacia Hidrográfica do Rio Taquari-Antas**. 2012. Disponível em: <http://www.sema.rs.gov.br/g040-bacia-hidrografica-do-rio-taquari-antas>. Acesso em: 14 maio. 2018.

SHAHABI, H.; HASHIM, M. Landslide susceptibility mapping using GIS-based statistical models and Remote sensing data in tropical environment. **Scientific Reports**, [s. l.], v. 5, p. 1–15, 2015.

VANACÔR, R. R. N.; ROLIM, S. S. B. A. Mapeamento Da Suscetibilidade a Deslizamentos Usando Técnicas De Estatística Bivariada E Sistema De Informações Geográficas Na Região Nordeste Do Rio Grande Do Sul. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, [s. l.], v. 13, p. 15–28, 2012. Disponível em: <http://www.lsie.unb.br/rbg/index.php/rbg/article/view/338>. Acesso em: 22 mai. 2019.