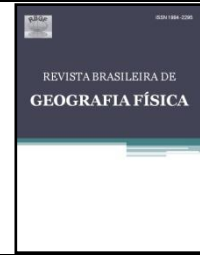




# Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: [www.ufpe.br/rbgfe](http://www.ufpe.br/rbgfe)



## Avaliação multicritério aplicada ao mapeamento a suscetibilidade a escorregamentos: o caso do Bairro Cascata, Porto Alegre, RS

Mariana Madruga de Brito<sup>1</sup>, Eliseu José Weber<sup>2</sup>, Alexandra Passuello<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Doutoranda em Geografia. Department of Hydrology and Water Resources Management, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Meckenheimer Allee, 172, 53115, Bonn, Alemanha. [mmdb@outlook.com](mailto:mmdb@outlook.com) (autor correspondente). <sup>2</sup> Professor adjunto na Universidade Luterana do Brasil e pesquisador associado no Centro de Ecologia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Av. Bento Gonçalves, 9500 Prédio 43411 / 203 - Bairro Agronomia, Porto Alegre/RS. E-mail para correspondência: [eweber@portoweb.com.br](mailto:eweber@portoweb.com.br). <sup>3</sup> Professora adjunta na Universidade Federal do Recôncavo da Bahia. Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas. Rua Rui Barbosa, 710 – Centro, Cruz das Almas/BA. E-mail para correspondência: [alepassuello@gmail.com](mailto:alepassuello@gmail.com).

Artigo recebido em 28/11/2016 e aceito em 03/01/2017

### RESUMO

O objetivo deste estudo foi mapear, com o emprego de uma técnica de avaliação multicritério em ambiente SIG, a suscetibilidade a escorregamentos no bairro Cascata, Porto Alegre. As variáveis utilizadas foram: declividade, litologia, pedologia, uso do solo e cobertura vegetal. Após a padronização das variáveis, definiu-se a importância de cada uma na predisposição do terreno a escorregamentos com o apoio da técnica de avaliação multicritério AHP (*Analytic Hierarchy Process*). Os resultados indicam que 3,27% da área de estudo possui alta suscetibilidade; 83,29% média; 11,98% baixa e 1,46% muito baixa. Verificou-se também que 70,12% da classe alta suscetibilidade já foi urbanizada, configurando-se em áreas prioritárias para a mitigação de riscos. Esse quadro tende a se agravar, uma vez que a expansão urbana é inevitável e contínua, e que à medida que a população cresce, ela modifica o território, potencializando a ocorrência desses desastres. Dessa forma, o mapa resultante constitui-se em subsídio importante para a tomada de decisão, possibilitando uma escolha mais racional na definição de estratégias de prevenção e intervenção do poder público. Isso demonstra que o geoprocessamento aliado a técnicas de avaliação multicritério, simplifica e torna ágil o mapeamento da suscetibilidade.

Palavras-chave: movimentos de massa, SIG, suscetibilidade, MCA, AHP.

### Multicriteria analysis applied to landslide susceptibility mapping: a case study in Cascata District, Porto Alegre, RS

### ABSTRACT

This study aims to map, with the use of a multi-criteria analysis (MCA) technique in a GIS environment, the landslide susceptibility in the Cascata district, Porto Alegre, Brazil. Variables used were: slope, geology, soil, land use and vegetation cover. After the standardization of these variables, their importance for landslides predisposition was defined with the support of the multi-criteria technique AHP (*Analytic Hierarchy Process*). Results indicate that 3.27% of the study area has a high susceptibility; 83.29% moderate, 11.89% low and 1.46% very low. It was also found that 70.12% of the high susceptibility class has already been urbanized, and therefore, should be considered as priority for risk mitigation. This situation tends to worsen since urban sprawl is inevitable and continuous, and as the populations grow, it changes the territory, enhancing the occurrence of these disasters. Thus, the resulting map is an important tool for decision making, enabling a more rational definition of public strategies for landslides prevention and intervention. This demonstrates that GIS combined with MCA techniques simplifies and makes the susceptibility mapping faster.

Keywords: landslides, GIS, susceptibility, MCA, AHP.

### Introdução

A crescente demanda por áreas para usos urbanos vem provocando a expansão das cidades sem a adoção de critérios adequados de ocupação e ordenamento do território. Este fator, aliado a

segregação socioespacial e ao alto custo de vida das metrópoles, impulsiona a ocupação de áreas impróprias à urbanização, como encostas íngremes e vales profundos (Di Martire et al., 2012). O

adensamento populacional nesses locais, sem considerar a fragilidade natural do ambiente, expõe a população à ocorrência de movimentos de massa, ocasionando prejuízos econômicos e sociais, bem como impactos ambientais (Fell et al., 2008; Zhu et al., 2014).

Na tentativa de mitigar tais impactos, vários estudos referentes ao mapeamento da suscetibilidade a escorregamentos têm sido desenvolvidos (e.g. Zinck et al., 2011; Günther et al., 2012, 2014; Feizizadeh et al., 2013, 2014; Brito, 2014; Pellicani et al., 2014; Dragičević et al., 2015). A suscetibilidade é definida como a possibilidade de ocorrência de um determinado fenômeno numa dada área com base em fatores condicionantes do terreno, independentemente do seu período ou probabilidade de recorrência (Zêzere et al., 2004). Esses estudos são fundamentais para a gestão de riscos, podendo auxiliar no direcionamento das políticas públicas para o planejamento do uso do solo, indicando locais inadequados para a ocupação urbana.

Diversos métodos de mapeamento de suscetibilidade foram propostos nas últimas décadas, os quais podem ser classificados em determinísticos, estatísticos e heurísticos (Guzetti et al., 1999). A opção por um ou outro método irá depender da disponibilidade e qualidade dos dados existentes, bem como da escala de mapeamento e resultados esperados (Aleotti e Chowdhury, 1999).

O mapeamento da suscetibilidade em áreas extensas por meio de abordagens determinísticas é de difícil execução, em virtude da necessidade de dados geotécnicos e hidrogeológicos detalhados e consequentes custos financeiros associados (Ayalew e Yamagishi, 2005). Da mesma maneira, métodos estatísticos demandam inventários de movimentos de massa precisos (Soeters e Van Westen, 1996), os quais são ainda escassos no Brasil. Por outro lado, muitas informações existentes podem ser utilizadas em avaliações preliminares de suscetibilidade a partir abordagens heurísticas, com o auxílio técnicas de avaliação multicritério (MCA - *Multicriteria Analysis*) em ambiente SIG. Tal método possibilita mapear com maior agilidade a suscetibilidade, e, dessa maneira, otimizar a aplicação de recursos, detalhando o levantamento de informações apenas nas áreas mais críticas (Carrara e Guzzetti, 1999).

Devido à facilidade de aplicação, diversas técnicas de avaliação multicritério têm sido utilizadas no mapeamento da suscetibilidade a escorregamentos (e.g. Gorsevski, et al., 2006; Ruff e Czurda, 2008; Kamp, 2008; Hasekiogullari, et al., 2012; Günther et al., 2012). Por exemplo, Komac (2006) utilizou o método de MCA denominado Processo Hierárquico Analítico (*Analytical*

*Hierarchy Process* – AHP) aliado à análise estatística multivariada, para mapear a suscetibilidade a movimentos de massa na Eslovênia. Roodposht et al. (2014) por sua vez, compararam os métodos *fuzzy* AHP e PROMETHEE II (*Preference Ranking Method for Enrichment Evaluation*) no mapeamento da suscetibilidade a escorregamentos no Irã.

Essas técnicas permitem comparar diferentes cenários, com base em múltiplos critérios e opiniões de diversos especialistas, com o objetivo de auxiliar os tomadores de decisão. Além disso, a MCA reduz a subjetividade inerente à atribuição de pesos às variáveis condicionantes dos escorregamentos, dando mais clareza e transparência a esse processo.

Partindo deste contexto, este estudo apresenta uma proposta metodológica para mapear, com o emprego de uma técnica de avaliação multicritério em ambiente SIG, a suscetibilidade a escorregamentos no bairro Cascata, Porto Alegre. A opção por essa área de estudo deve-se à sua elevada propensão a movimentos de massa, sendo o bairro com o maior número de ocorrências desses desastres no município.

## Material e métodos

### Caracterização da área de estudo

A área de estudo compreende o bairro Cascata (734,14 ha), localizado na porção central do município de Porto Alegre, entre as coordenadas 30°04' e 30°06' de latitude sul e 51°12' e 51°08' de longitude oeste (Figura 1). O clima da região, conforme a classificação de Köppen, é do tipo Cfa, subtropical úmido com verão quente, por registrar temperaturas médias entre -3°C e 18°C no mês mais frio e superior a 22°C no mês mais quente.

Os litotipos predominantes são o Granito Santana e Viamão (Koester et al., 2001; Phillip, 2008), os quais apresentam estrutura foliada quando em zonas de cisalhamento dúctil e cataclásada quando em zonas de falha. Essas estruturas atuam como caminhos preferenciais de alteração das rochas, permitindo que a frente de intemperismo avance para o interior do maciço de maneira mais efetiva.

Ocorrem também unidades gnáissicas bastante alteradas, representadas pelos Gnaisses Porto Alegre (Phillip e Campos, 2004). Como unidades de cobertura, ocorrem depósitos sedimentares aluviais (Villwock e Tomazzeli, 1995), cujo posicionamento topográfico não favorece a ocorrência de escorregamentos.

O bairro está inserido na principal estrutura tectônica e feição geomorfológica do município, denominada Crista de Porto Alegre (Menegat et al.,

2006). O relevo é montanhoso, com altitudes médias entre 210 e 240 m, elevação máxima de 294 m e declividades predominantes entre 10 e 20%. As vertentes apresentam forma retilíneo-côncava, com uma rede de drenagem caracterizada por arroios com vales bem entalhados (Moura e Dias, 2012).

Em virtude das características físicas do território e da ocupação desordenada das vertentes, o município de Porto Alegre é altamente suscetível a escorregamentos (Fujimoto, 2002), sendo que a área mais afetada é o bairro Cascata (Reckziegel, 2012; Brito et al., 2016).

Porto Alegre possui o maior número de registros de ocorrência de movimentos de massa do Estado do Rio Grande do Sul (Reckziegel, 2007), com um total de 247 registros entre os anos de 2007 e 2013 (Brito et al., 2016). No período entre 1980 e 2005, seis pessoas morreram e doze ficaram

feridas em decorrência destes processos no município (Reckziegel, 2007). Devido a essa elevada suscetibilidade, Porto Alegre foi considerado prioritário pelo Governo Federal nas ações de prevenção de desastres naturais (Ministério da Integração, 2013).

Os escorregamentos no bairro Cascata estão associados, principalmente, aos corpos graníticos, os quais se encontram intensamente fraturados devido à elevada densidade de lineamentos. Eles ocorrem geralmente em áreas ocupadas, sendo que a intervenção antrópica no território, por meio da execução de cortes com inclinação excessiva, construção de aterros com materiais inadequados e o lançamento de águas servidas e pluviais diretamente nas encostas, têm sido a principal responsável pela deflagração desses processos (Figura 2).

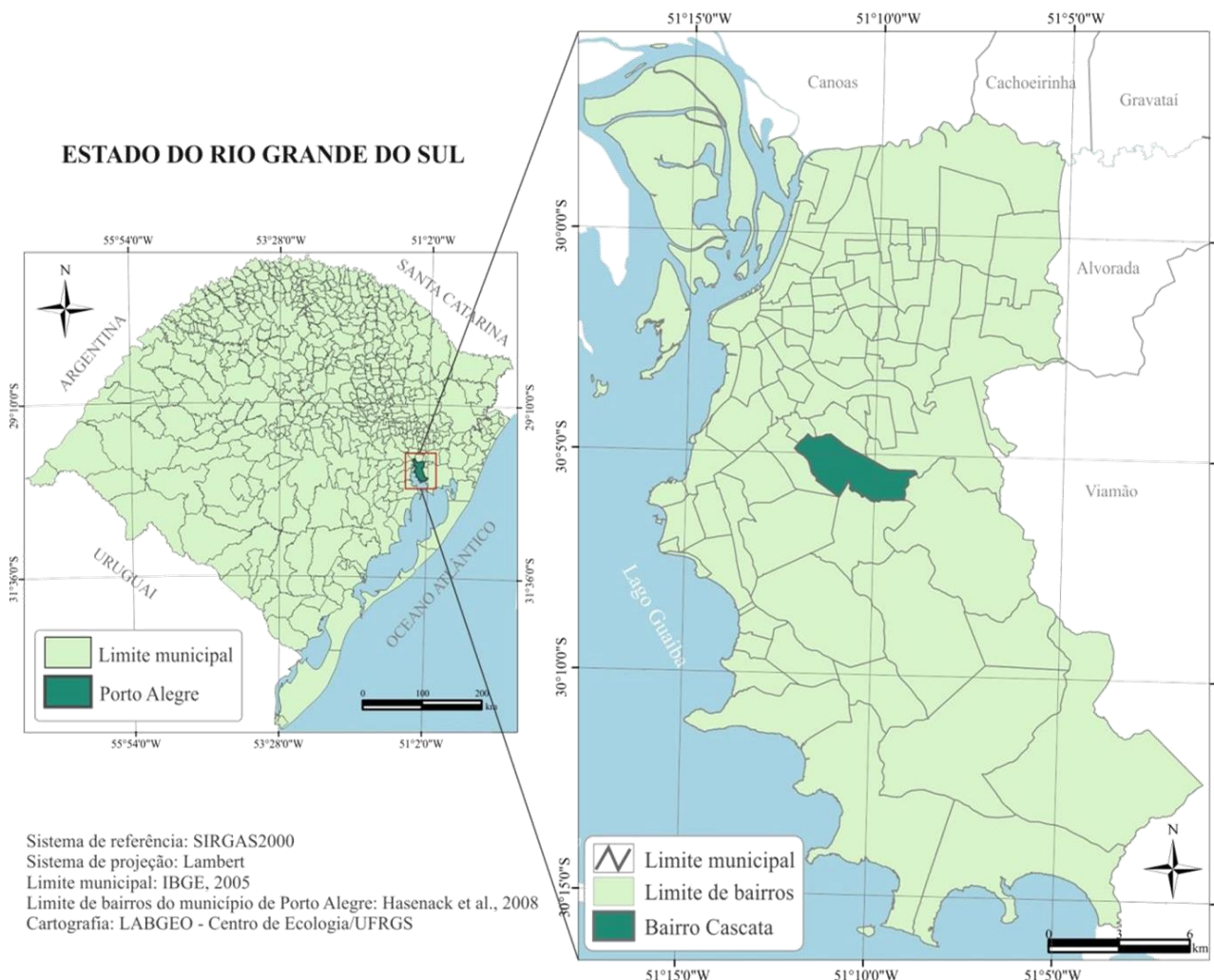


Figura 1. Localização do bairro Cascata, Porto Alegre, Rio Grande do Sul.



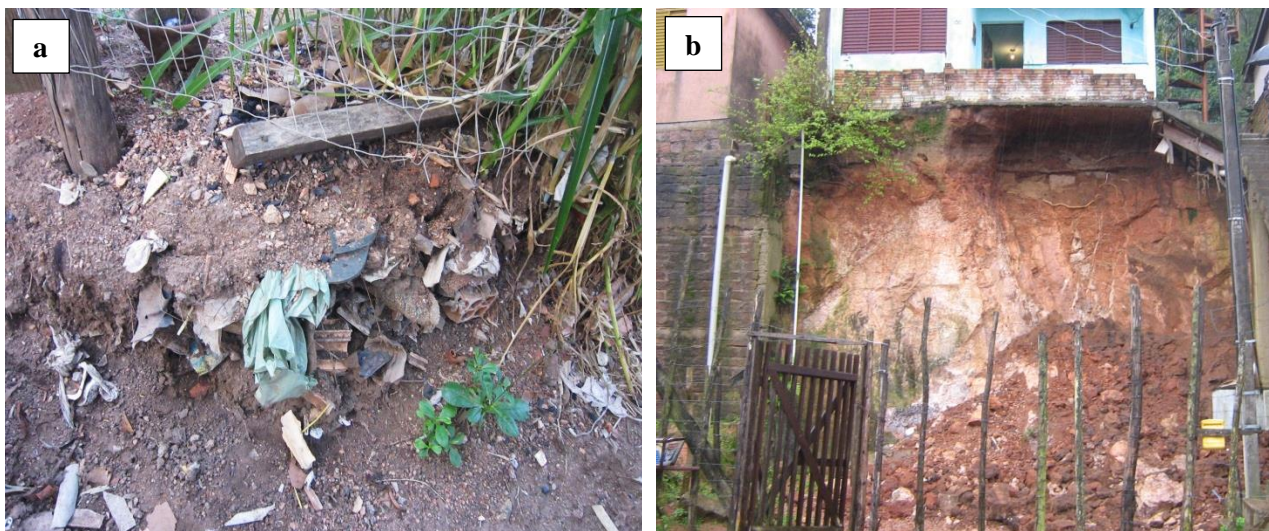


Figura 2. Intervenção antrópica no bairro Cascata: (a) aterro construído com materiais impróprios (b) escorregamento associado à um corte com geometria inadequada (Fotos cedidas pelo Programa de Áreas de Risco - PAR).

#### Aplicação da técnica de avaliação multicritério AHP

A primeira etapa do estudo consistiu na seleção dos fatores que condicionam a suscetibilidade na área de estudo. Com base na revisão na literatura e consulta a especialistas, selecionaram-se as variáveis declividade (Figura 3), pedologia (Figura 4), litologia (Figura 5), uso do solo e cobertura vegetal (Figura 6). Para representar essas variáveis, utilizaram-se os mapas disponíveis no Diagnóstico Ambiental de Porto Alegre (Hasenack et al., 2008).

Além disso, foi elaborado um MDE a partir de curvas de nível estruturadas para uso em SIG por Hasenack et al. (2010) na escala 1:1.000. O método de interpolação utilizado foi uma rede triangular irregular (*Triangular Irregular Network - TIN*) e uma função parabólica para ajustar as quebras de relevo e eliminar os efeitos de ponte e de túnel (Eastman, 2009). A partir do MDE, derivou-se o mapa de declividades com resolução espacial de 5 m, o qual foi reclassificado segundo os intervalos preconizados por Marcelino et al. (2009). Para o processamento dos dados foram empregados os programas de SIG Idrisi Selva (©ClarkLabs) e ArcMap 10 (©ESRI).

O segundo passo consistiu na padronização das variáveis para uma escala de valores comum, que varia de 0 (menor contribuição para os escorregamentos) a 1 (maior contribuição para os escorregamentos) (Tabela 1). Esse procedimento foi realizado por meio da atribuição direta de notas, com base na revisão da literatura.

Para a padronização da declividade considerou-se que, quanto maior a inclinação, maior será a suscetibilidade, visto que o aumento do ângulo implica em uma redução do fator de Brito, M. M., Weber, E. J., Passuello, A.

segurança da encosta (Lee e Min, 2001; Fernandes et al., 2001; Vanacôr e Rolim, 2012).

Com relação à geologia, considerou-se que a o Granito Santana é o litotipo mais suscetível, pois além de apresentar a maior parte dos escorregamentos de acordo com o inventário elaborado por Brito et al. (2016), o mesmo encontra-se bastante afetado pelo intemperismo. Os depósitos sedimentares, por outro lado, receberam os menores valores, visto que situam-se em locais topograficamente mais baixos.

A vegetação foi considerada benéfica para a estabilidade, uma vez que ela reduz a quantidade de água nas camadas superficiais do solo, o que aumenta a sua resistência e reduz o incremento de poropressão (Lemes, 2001). Os sistemas radiculares de grande densidade, com raízes que se espalham horizontalmente e em profundidade, auxiliam a reduzir o cisalhamento do solo (Suarez, 1997). Portanto, as classes arbórea e arbustiva receberam notas inferiores de suscetibilidade em contraste à classe herbácea. Já os locais com solo exposto são desfavoráveis à estabilidade, pois o terreno está sujeito à ação direta da chuva e aos processos erosivos.

Para a variável pedologia verificou-se que os escorregamentos ocorrem principalmente em associação de Cambissolos (CX) e Argissolos (PV1 e PV2) (Brito et al., 2016) e, portanto, essas classes receberam as maiores notas. Os cambissolos tendem a ser mais suscetíveis, devido à camada impermeável gerada pelo substrato rochoso, que favorece a saturação do solo e a presença de escoamento sub-superficial (Marcelino, 2003).

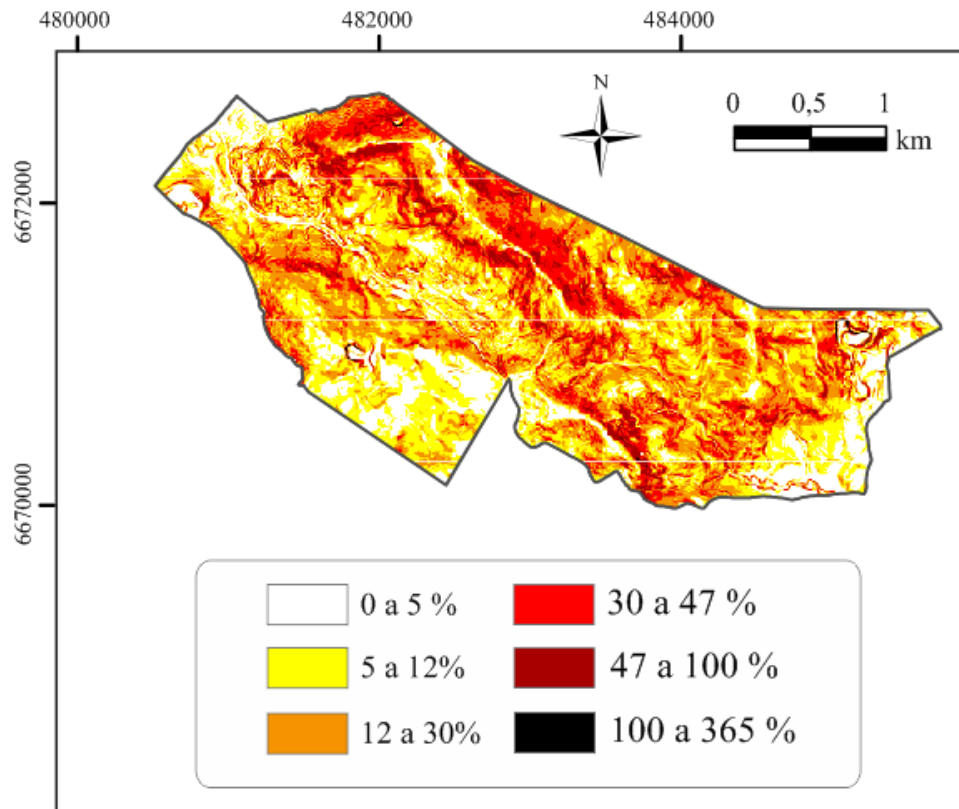


Figura 3. Variável declividade. Sistema de referência: SAD69; Sistema de projeção: UTM; Base cartográfica: Hasenack et al. (2008).

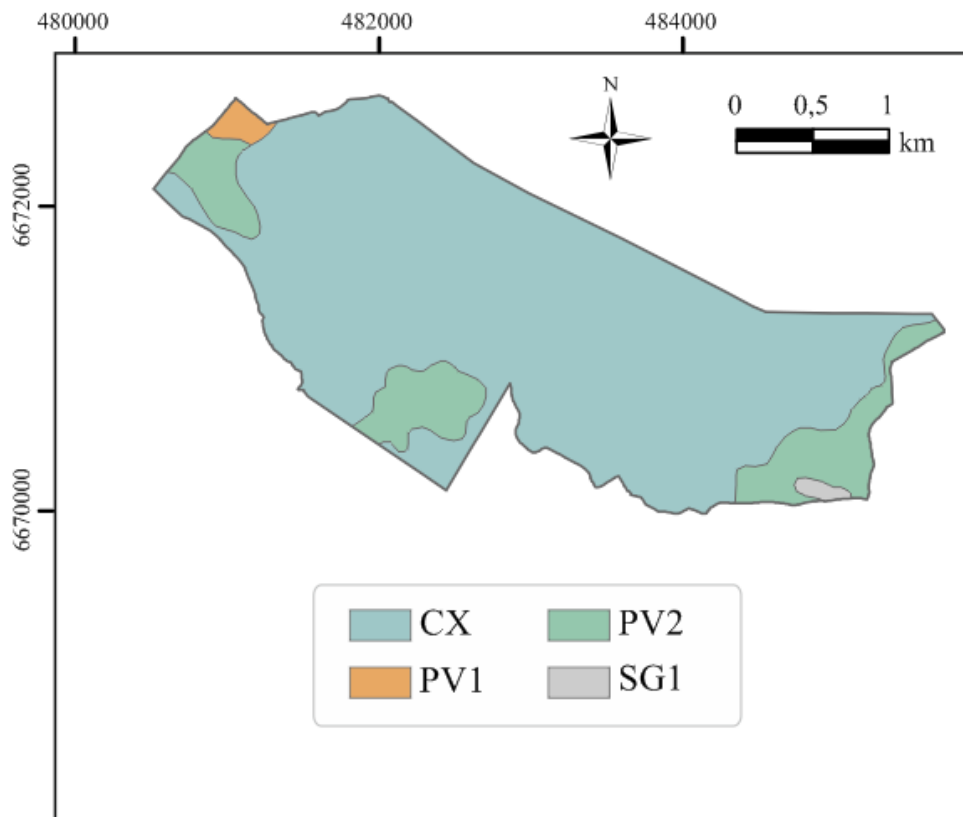


Figura 4. Variável pedologia (CX: associação de cambissolos háplicos com neossolos litólicos ou neossolos regolíticos; PV2: associação de argissolos vermelhos ou argissolos vermelho-amarelos com cambissolos háplicos; PV1: grupo indiferenciado de argissolos vermelhos e argissolos vermelho-amarelos; SG1: associação de planossolos hidromórficos, gleissolos háplicos e plintossolos argilúvicos). Sistema de referência: SAD69; Sistema de projeção: UTM; Base cartográfica: Hasenack et al. (2008).

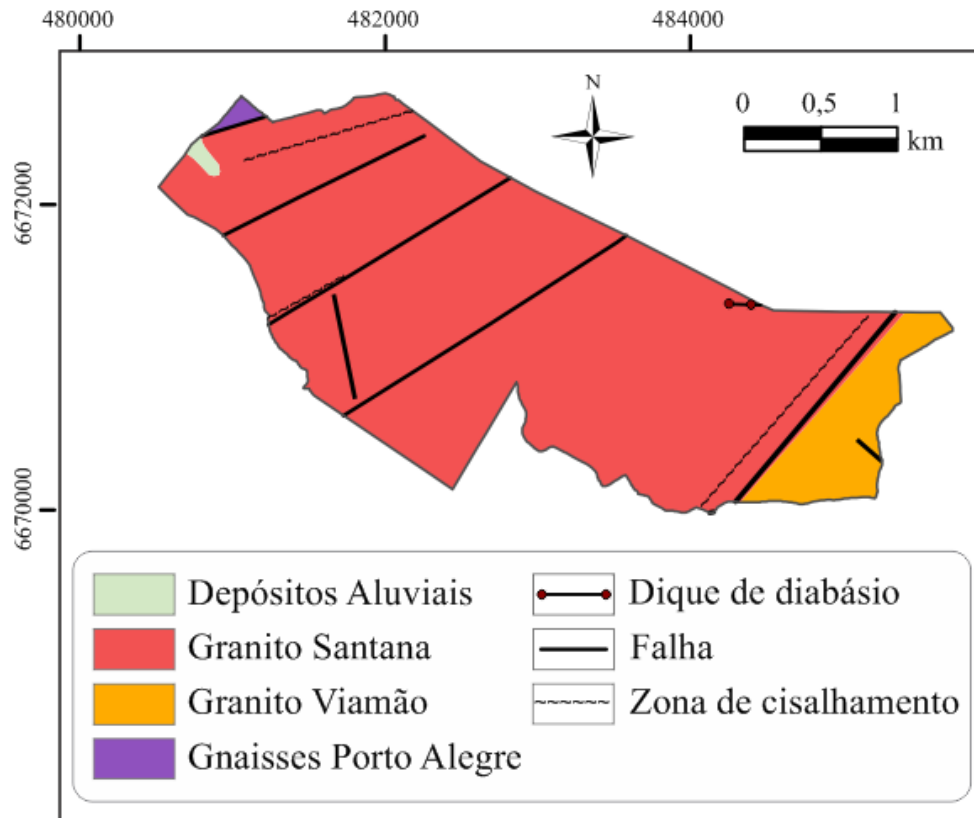


Figura 5. Variável litologia. Sistema de referência: SAD69; Sistema de projeção: UTM; Base cartográfica: Hasenack et al. (2008).

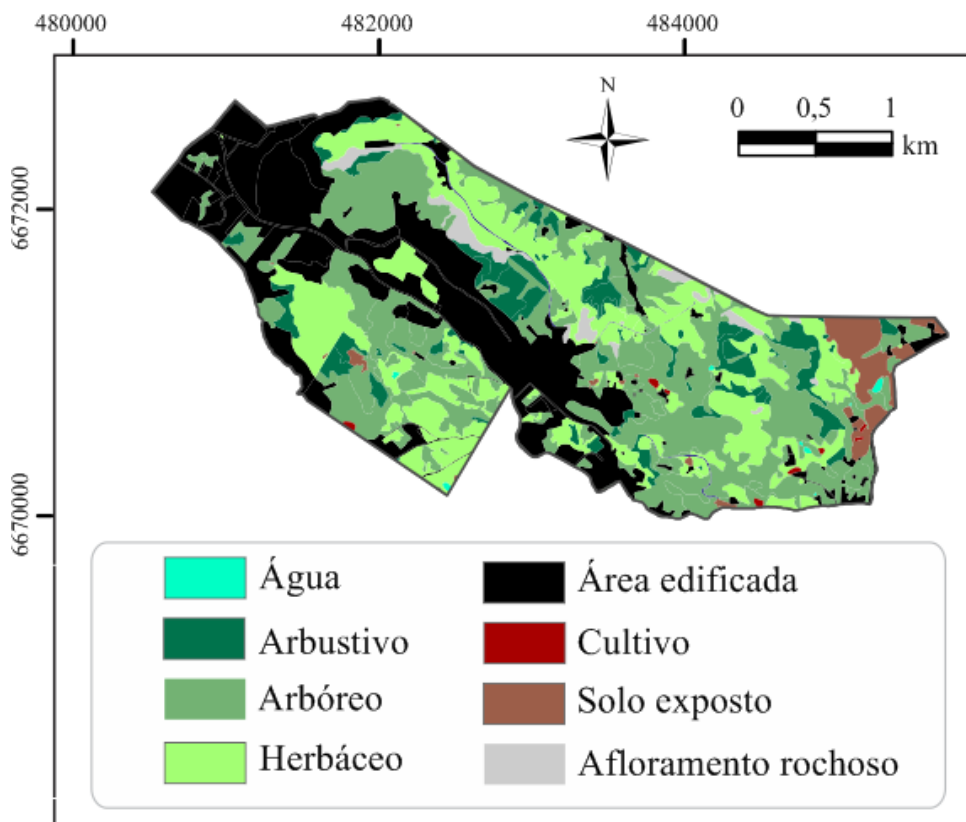


Figura 6. Variável uso do solo e cobertura vegetal. Sistema de referência: SAD69; Sistema de projeção: UTM; Base cartográfica: Hasenack et al. (2008).

Tabela 1. Notas atribuídas às classes temáticas das variáveis condicionantes dos escorregamentos.

Variável	Classe	Nota	Variável	Classe	Nota
<i>Uso do solo e cobertura vegetal</i>	Água	0,0	<i>Declividade</i>	0 a 5 %	0,1
	Arbóreo	0,1		5 a 12 %	0,2
	Arbustivo	0,1		12 a 30%	0,6
	Cultivo	0,1		30 a 47%	0,8
	Herbáceo	0,2		47 a 100 %	0,9
	Área urbana	0,6		> 100%	0,9
<i>Pedologia</i>	Afloramento rochoso	0,6	<i>Litologia</i>	Depósitos Aluviais	0,1
	Solo exposto	0,8		Gnaisses Porto Alegre	0,2
	SG1	0,1		Granito Viamão	0,5
	PV1	0,5		Granito Santana	0,7
	PV2	0,6			
	CX	0,7			

A importância de cada variável na predisposição do terreno a escorregamentos foi determinada com apoio da técnica de avaliação multicritério AHP, desenvolvida por Saaty (1977) e implementada no software Idrisi Selva.

Nessa técnica, as variáveis são comparadas sempre dois a dois, a partir de uma escala que varia de 1/9 a 9 (Figura 7), de menos a mais importante. Dessa forma, problemas complexos são decompostos em comparações mais simples. A realização desses julgamentos é uma etapa de debates e discussões, onde deve ser solicitado o conhecimento de vários especialistas, de modo a contemplar adequadamente diferentes pontos de vista (Brito e Evers, 2016).

Uma vez montada a matriz de comparação pareada, o peso de cada variável é calculado a partir do autovetor principal da matriz, conforme mostrado na Equação 1. Após essa etapa, determina-se o grau de consistência (*Consistency Ratio* - CR), o qual indica a probabilidade dos valores da matriz terem sido gerados ao acaso. Quanto mais próximos os resultados forem de zero, mais coerentes são os pesos. Caso esse valor seja superior a 0,10, ou seja, 10% de inconsistência, é necessário descartar os resultados e refazer os

julgamentos (Saaty, 2008). Uma descrição detalhada dessa técnica pode ser encontrada em Belton e Stewart (2002) e em Saaty (1977).

$$Aw = \lambda_{m\acute{a}x} \quad \text{Equação 1}$$

Onde: A é a matriz de comparação par a par; w é o vetor de pesos pretendidos; e  $\lambda_{m\acute{a}x}$  é o máximo autovalor da matriz A.

A matriz de comparação pareada e os pesos obtidos neste estudo são apresentados na Tabela 2, onde o valor  $a_{ij}$  representa a importância relativa da variável da linha i em face de variável da coluna j. A razão de consistência obtida foi de 0,01 ou 1%, o que indica que os julgamentos são adequados. Os julgamentos foram realizados com base na revisão da literatura e consulta a especialistas com experiência prática na temática.

A variável com o maior peso foi a declividade (0,6140), o que é coerente com os valores adotados por Ayalew et al. (2004), Abella e Van Westen (2007), Reis et al. (2012) e Günther (2012). A pedologia foi a segunda variável com maior importância, seguida da litologia e do uso do solo e cobertura vegetal.

1/9	1/7	1/5	1/3	1	3	5	7	9
extremamente	muito	fortemente	moderadamente	igualmente	moderadamente	fortemente	muito	extremamente
	fortemente						fortemente	

Menos importante

Igualmente importante

Mais importante

Figura 7. Escala de intensidade de importância relativa entre os fatores (Eastman, 2009).

Tabela 2. Matriz de comparação pareada das variáveis condicionantes dos escorregamentos.

Variáveis	Uso do solo e cobertura vegetal	Declividade	Pedologia	Litologia	Peso
Uso do solo e cobertura vegetal	1				0,0932
Declividade	6	1			0,6140
Pedologia	2	1/4	1		0,1808
Litologia	1	1/5	1/2	1	0,1020

A última etapa para a elaboração do mapa de suscetibilidade consistiu na agregação das variáveis por meio de uma combinação linear ponderada (*Weighted Linear Combination - WLC*). Para tanto, as variáveis padronizadas dentro do intervalo de 0 a 1 foram multiplicadas pelo seu respectivo peso, obtido através da técnica AHP (Equação 2). Esse cálculo foi realizado para cada *pixel*, por meio de uma álgebra com mapas.

$$\text{Suscetibilidade} = f_{dec} * 0,6140 + f_{lit} * 0,1020 + f_{ped} * 0,1808 + f_{uso} * 0,0932 \quad \text{Equação 2}$$

Onde: f são os fatores declividade, litologia, pedologia, e uso do solo e cobertura vegetal.

A partir da WLC, obteve-se um mapa onde as notas de suscetibilidade variam de maneira contínua entre o intervalo de 0,1317 a 0,7966, de menor a maior suscetibilidade. Esses valores indicam que devido aos pesos e notas adotados, nenhum local do bairro Cascata possui grau de suscetibilidade máximo ou mínimo. De forma a possibilitar a hierarquização dos graus de suscetibilidade, efetuou-se a reclassificação do mapa nas seguintes classes: muito baixa (0,0 a 0,25), baixa (0,25 a 0,50), média (0,50 a 0,75) e alta (0,75 a 1,00).

A validação dos mapas de suscetibilidade é fundamental para determinar sua precisão, e dessa forma, orientar a tomada de decisões sobre a sua utilização. Nesse sentido, uma verificação em campo foi conduzida com o objetivo de avaliar e comparar o produto cartográfico com a realidade observada no terreno. Para tal, foi realizada uma

inspeção na área mais crítica do bairro, localizada na Vila Jardim Cascata (Figura 8), junto à divisa com o bairro Coronel Aparício Borges e Glória. A visita técnica foi acompanhada pelo líder comunitário e moradores locais.

### Resultados e discussão

Mapa de suscetibilidade a movimentos de massa

O mapa de suscetibilidade obtido, bem como uma síntese das características de cada classe de suscetibilidade é apresentado na Figura 8 e na Tabela 3, respectivamente.

As regiões com **suscetibilidade muito baixa** totalizam 10,7 ha, o equivalente a 1,46% da área de estudo e localizam-se em no sudeste e sudoeste. Essa classe é constituída principalmente por vegetação arbórea, com declividades inferiores a 5%. Devido a essas características, não se espera que ocorram movimentos de massa nessa classe. Quando comparada com as demais, verifica-se que a classe de muito baixa suscetibilidade possui a menor taxa de urbanização, com apenas 8,31%. Isso ocorre porque embora essas regiões apresentem características adequadas à ocupação sobre o ponto de vista de escorregamentos, elas são frequentemente afetadas por inundações.

A classe de **suscetibilidade baixa** possui 87,97 ha ou 11,98% da área de estudo. Ela se concentra nas regiões periféricas, em locais com relevo suave ondulado, com declividades entre 5 e 12%. Essa classe apresenta as melhores condições geomorfológicas e geotécnicas para a ocupação, sendo que nela ocorre uma expressiva urbanização



(44,82%). A probabilidade de ocorrência de escorregamentos é praticamente inexistente, pois o terreno é plano, não permitindo o fluxo rápido de massas de solo ou rocha pelo efeito da gravidade. Dessa forma, o direcionamento das ocupações deveria ser realizado preferencialmente nesses

locais. Entretanto, a ocorrência de escorregamentos não pode ser desconsiderada, pois mesmo em locais onde os fatores naturais não são favoráveis a esses desastres, a intervenção inadequada do homem pode desencadeá-los.

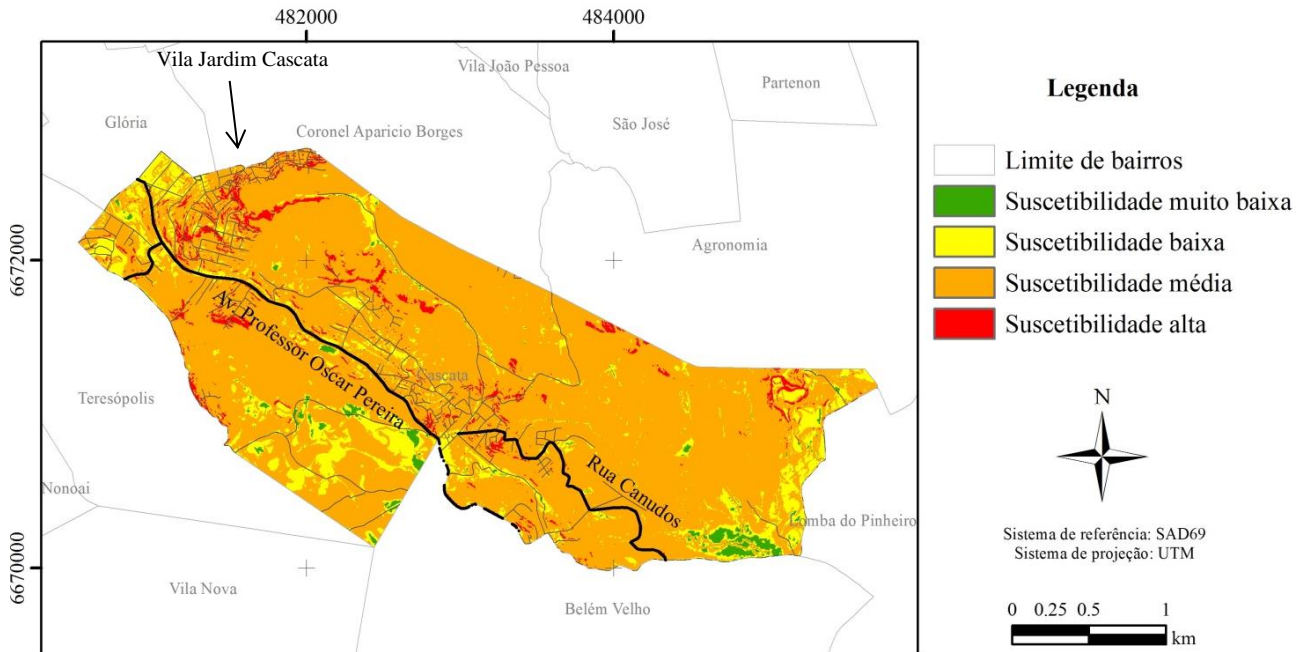


Figura 8. Mapa de suscetibilidade a escorregamentos do bairro Cascata, Porto Alegre.

Aproximadamente 83% ou 611,48 ha do território foi classificado com **suscetibilidade média**. Essa classe distribui-se em terrenos com relevo ondulado (12 a 30%) e forte ondulado (30 a 47%) ao longo de toda a área, sendo constituída basicamente pelos estratos vegetais arbóreo, herbáceo e arbustivo. A maior parte das ocupações do bairro concentra-se nessa classe, com um total de 162,56 ha de áreas urbanizadas. A probabilidade de ocorrência de escorregamentos nestas regiões é reduzida, entretanto os riscos porventura existentes relacionam-se com situações pontuais induzidas por intervenções antrópicas, como a execução de cortes e aterros sem considerar as normas técnicas de engenharia. Dessa forma, é essencial realizar vistorias de campo com o intuito de distinguir as áreas aptas à ocupação sem nenhum tipo de restrição, daquelas que requerem a adoção de medidas de mitigação de riscos. Nesses locais o planejamento urbano e a implantação de melhorias de infraestrutura urbana podem garantir condições seguras de habitação.

As regiões com **suscetibilidade alta** ocupam apenas 23,99 ha ou 3,27% do bairro. Essa classe localiza-se na porção noroeste, nas áreas de mineração situadas na extremidade nordeste e junto à estrada Embratel. Esses locais apresentam relevo

montanhoso a escarpado, com declividades entre 47% a 100%, inadequadas a qualquer forma de uso e ocupação (Marcelino et al., 2009). Um total de 10,49% da classe é composto por solos expostos, os quais favorecem os escorregamentos, devido à ação da erosão. A ocorrência de escorregamentos é iminente, podendo ser desencadeados e/ou acelerados por precipitações pluviais intensas e/ou de grande volume. Deste modo, esses locais deveriam sofrer fortes restrições de uso e ocupação. Apesar de essa unidade representar a máxima restrição de uso, 70,12% da área já se encontra urbanizada, configurando-se em áreas de risco. Portanto, nos locais já ocupados pelo homem, recomenda-se realizar o mapeamento do risco, o qual irá subsidiar a definição de ações estruturais e não estruturais mais adequadas para mitigar os danos associados a ocorrência de eventuais desastres.

Inspecções em campo na Vila Jardim Cascata demonstraram compatibilidade entre o cenário produzido e as condições reais presenciadas. Além disso, ao comparar os resultados obtidos com o zoneamento das áreas de risco produzido pela CPRM nota-se que há uma similaridade entre as áreas com alta suscetibilidade e os setores de risco (Figura 9). Ressalta-se que o

mapeamento da CPRM considera apenas as áreas urbanizadas e, portanto, os locais com suscetibilidade alta localizados no nordeste do bairro não se configuram em setores de risco, visto que não são ocupados pelo homem. A vantagem com relação a este mapa é que, no presente estudo,

a avaliação da suscetibilidade foi realizada de forma homogênea para todo o bairro, considerando os mesmos critérios. Além disso, as regras de decisão adotadas são explícitas, o que traz mais clareza e transparência ao mapeamento.

Tabela 3. Síntese das características de cada classe de suscetibilidade a escorregamentos.

Variável	Classe	Classe de suscetibilidade							
		Muito Baixa		Baixa		Média		Alta	
		(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)
Uso do solo e cobertura vegetal	Água	0,33	3,11	0,48	0,55	0,40	0,07	-	-
	Arbóreo	<b>6,05</b>	<b>56,52</b>	23,11	26,27	<b>217,15</b>	<b>35,51</b>	-	-
	Arbustivo	0,47	4,41	2,45	2,78	58,42	9,55	-	-
	Cultivo	-	-	0,22	0,25	1,40	0,23	-	-
	Herbáceo	2,96	27,65	13,05	14,83	150,37	24,59	-	-
	Área urbana	0,89	8,31	<b>39,43</b>	<b>44,82</b>	162,56	26,58	<b>16,82</b>	<b>70,12</b>
	Afloramento rochoso	-	-	0,29	0,33	10,07	1,65	4,65	19,40
	Solo exposto	-	-	8,95	10,17	11,11	1,82	2,52	10,49
Declividade	0 a 5 %	<b>10,17</b>	<b>94,98</b>	14,07	15,99	-	-	-	-
	5 a 12 %	0,54	5,02	<b>73,28</b>	<b>83,31</b>	-	-	-	-
	12 a 30%	-	-	0,62	0,70	<b>325,81</b>	<b>53,28</b>	-	-
	30 a 47%	-	-	-	-	220,88	36,12	0,07	0,30
	47 a 100 %	-	-	-	-	64,05	10,47	<b>23,13</b>	<b>96,45</b>
	> 100%	-	-	-	-	0,74	0,12	0,78	3,25
Pedologia	SG1	2,11	19,71	0,87	0,99	0,58	0,09	-	-
	CX	<b>5,10</b>	<b>47,62</b>	<b>49,75</b>	<b>56,55</b>	<b>547,97</b>	<b>89,61</b>	<b>23,28</b>	<b>97,04</b>
	PV2	3,50	32,67	32,32	36,74	60,89	9,96	0,64	2,66
	PV1	-	-	5,03	5,72	2,05	0,33	0,07	0,30
Litologia	Depósitos Aluviais	0,22	2,08	1,07	1,21	1,29	0,21	-	-
	Gnaisses POA	0,02	0,14	2,54	2,89	0,83	0,14	-	-
	Granito Viamão	<b>5,31</b>	<b>49,58</b>	18,43	20,95	37,14	6,07	0,36	1,48
	Granito Santana	5,16	48,20	<b>65,93</b>	<b>74,95</b>	<b>572,21</b>	<b>93,58</b>	<b>23,63</b>	<b>98,52</b>

Percebe-se um predomínio de áreas com suscetibilidade média, sendo que as classes alta e Brito, M. M., Weber, E. J., Passuello, A.

muito baixa foram subestimadas. Isso ocorreu, em parte, devido à reclassificação do mapa em classes.

O histograma do mapa de suscetibilidade não é linear, com uma concentração de *pixels* no intervalo de 0,65 a 0,70. Dessa forma seria interessante testar outras funções como o intervalo equivalente, quantil e quebra natural para reclassificar o mapa e evitar a superestimação das áreas com suscetibilidade média (Kanungo et al., 2006).

Além disso, seria desejável manter a variabilidade da variável declividade, visto que a mesma apresenta valores que variam continuamente na superfície. Sendo assim, a padronização utilizando à lógica *fuzzy* (Zadeh, 1965) proporcionaria uma melhor aproximação da realidade, visto que ela evita a definição de limites rígidos entre as classes de declividade (Burroughs e McDonnell, 1998). Por fim, para gerar cenários de suscetibilidade mais coerentes com a realidade e reduzir a subjetividade, é essencial considerar o conhecimento de especialistas locais para padronizar e ponderar as variáveis condicionantes (Brito e Evers, 2016). A participação de múltiplos experts e tomadores de decisão é um dos elementos centrais da abordagem MCA (Zagonari e Rossi, 2013), a qual não foi explorada nesse estudo em virtude da demanda de tempo.

Contudo, apesar destas limitações, acredita-se que os resultados obtidos são satisfatórios, permitindo avaliar preliminarmente a suscetibilidade a escorregamentos a um baixo custo e com poucas variáveis. Desta forma, o mapa elaborado pode contribuir para o planejamento estratégico dos órgãos de prevenção e resposta de desastres, podendo auxiliar no direcionamento das ações de mitigação e monitoramento de desastres.

A urbanização e sua relação com a suscetibilidade no bairro Cascata

A ocupação desempenha um papel fundamental na delimitação das áreas de risco a escorregamentos, pois sua presença ou não define se as mesmas são consideradas áreas de risco, ou apenas suscetíveis. Nesse sentido, a Tabela 4 apresenta a distribuição do tipo de ocupação (regular, irregular e comercial) em cada classe de suscetibilidade.

Nota-se que o bairro Cascata é formado predominantemente por ocupações irregulares (64,67% ou 132,90 ha), caracterizadas por edificações construídas com baixos recursos, geralmente sem fundação, saneamento básico e padrão viário (Nogueira et al., 2007). Nesses locais, o baixo padrão construtivo aliado à elevada densidade populacional e à falta de recursos para enfrentar esses desastres aumenta a vulnerabilidade da população. Apenas 26,76% da área de estudo é composta por ocupações regulares, onde houve um loteamento precedente à ocupação. Esse tipo de ocupação possui menor vulnerabilidade, pois geralmente apresenta um padrão construtivo médio/alto, saneamento básico, ruas e calçadas pavimentadas. Os restantes 8,57% são compostos por comércio, o qual engloba fábricas, armazéns, galpões e depósitos, os quais geralmente apresentam um padrão construtivo médio/alto.

Com relação às classes de suscetibilidade, verifica-se que à medida que a suscetibilidade aumenta, maior é a proporção de ocupações irregulares. Isso está de acordo com o mencionado por Moura e Silva (2008), os quais afirmam que as pessoas mais vulneráveis socialmente são também aquelas mais vulneráveis aos desastres naturais, em virtude da segregação socioespacial.

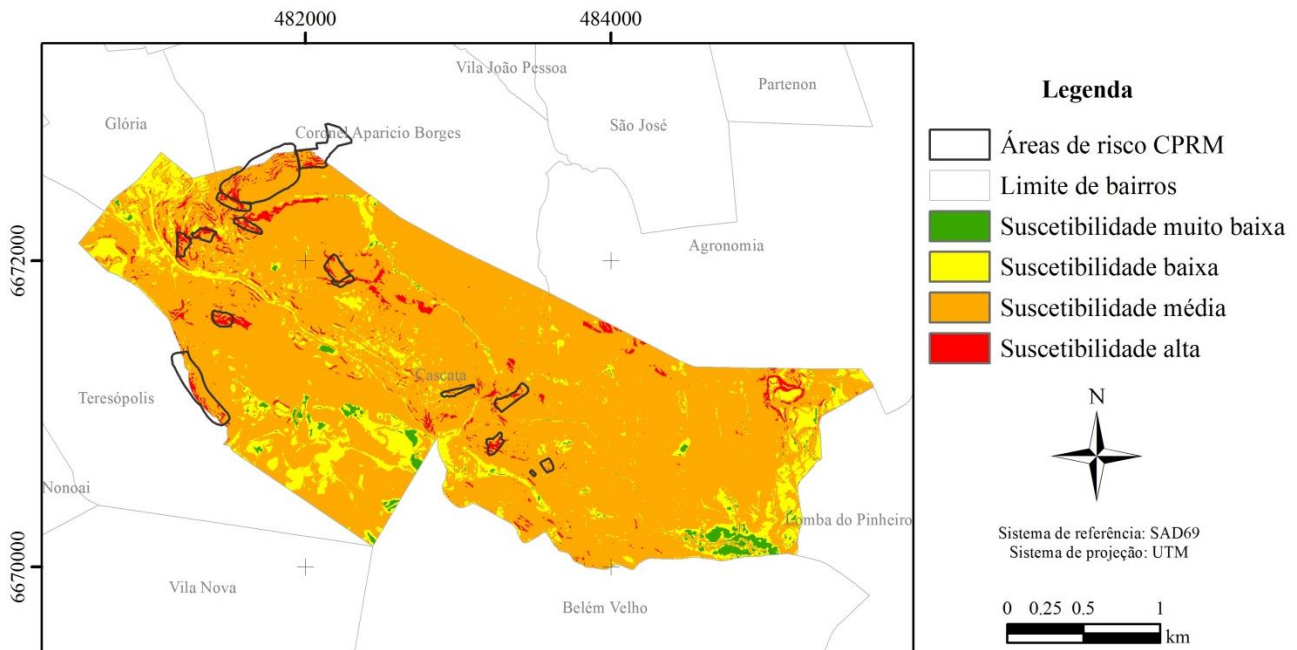


Figura 9. Comparação entre os setores de risco alto e muito alto à ocorrência de movimentos de massa mapeados pela CPRM com as classes de suscetibilidade a escorregamento.

Tabela 4. Tipo de ocupação em cada classe de suscetibilidade a escorregamentos.

Tipo de ocupação	Muito Baixa		Baixa		Média		Alta		Total	
	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)
Ocupação regular	0,74	95,19	15,16	45,20	36,91	23,85	2,20	13,31	55,00	26,76
Ocupação irregular	-	-	12,66	37,75	106,13	68,60	14,11	85,57	132,90	64,67
Comercial	0,03	4,21	5,72	17,05	11,68	7,55	0,19	1,12	17,62	8,57
Total	0,77	100	33,54	100	154,72	100	16,49	100	205,52	100

Dessa forma, os locais urbanizados na classe de suscetibilidade alta, principalmente irregulares, são prioritários para a implantação de intervenções estruturais de redução de risco. Nessas áreas é necessário desenvolver estudos detalhados, no sentido de cadastrar as áreas mais críticas nas quais é indispensável realocar a população residente ou adotar medidas de proteção, de modo a mitigar potenciais perdas e danos.

### Considerações finais

Os resultados mostram que a avaliação multicritério em ambiente SIG constitui-se em uma importante ferramenta no mapeamento das áreas sujeitas a escorregamentos, simplificando e tornando ágil esse processo.

A técnica AHP potencializa o uso das informações disponíveis, permitindo avaliar a suscetibilidade de uma maneira transparente. Contudo, é necessário ressaltar que a qualidade dos resultados obtidos por meio dessa técnica é diretamente relacionada à seleção das variáveis e das regras de decisão, sendo estas as etapas que devem exigir maior esforço e atenção.

As diferentes classes de suscetibilidade obtidas facilitam a hierarquização dos locais mais suscetíveis e favorecem a determinação de prioridades para o planejamento e direcionamento das ocupações humanas. Nesse sentido, o mapa produzido constitui-se em um subsídio importante para a identificação de potenciais situações de conflito entre a dinâmica das encostas e a ocupação humana, de modo a evitar a consolidação da

ocupação nas áreas inseridas na classe de suscetibilidade alta.

O mapa permite ainda indicar, preliminarmente, locais onde é necessário realizar mapeamentos detalhados de perigo e risco, possibilitando melhor planejamento dos recursos humanos, tecnológicos e financeiros.

Contudo, ressalta-se que o mapa de suscetibilidade elaborado não pode ser entendido como de caráter definitivo, mas sim um instrumento de suporte para facilitar o monitoramento dos lugares mais críticos, sendo indispensável a validação *in loco*.

### Agradecimentos

A primeira autora agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa N. 131160/2012-5.

### Referências

Abella, E.A.C., Van Westen, C.J., 2007. Generation of a landslide risk index map for Cuba using spatial multi-criteria evaluation. *Landslides* 4, 311-325. doi:10.1007/s10346-007-0087-y.

Aleotti, P., Chowdhury, R., 1999. Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 58, 21-44. doi:10.1007/s100640050066.

Ayalew, L., Yamagishi, H., 2005. The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan. *Geomorphology* 65, 15-31. doi:10.1016/j.geomorph.2004.06.010.

Ayalew, L., Yamagishi, H., Ugawa, N., 2004. Landslide susceptibility mapping using GIS-based weighted linear combination, the case in Tsugawa area of Agano River, Niigata Prefecture, Japan. *Landslides* 1, 73-81. doi:10.1007/s10346-003-0006-9.

Belton, V., Stewart, T., 2002. Multiple criteria decision analysis: an integrated approach, 1 ed., Kluwer Academic Publishers, Boston.

Brito, M.M., 2014. Geoprocessamento aplicado ao mapeamento da suscetibilidade a escorregamentos no município de Porto Alegre, RS. Dissertação (Mestrado). Porto Alegre, UFRGS.

Brito, M.M., Evers, M., 2016. Multi-criteria decision-making for flood risk management: A survey of the current state of the art. *Natural Hazards and Earth Systems Sciences* 16, 1019-1033, doi: 10.5194/nhess-16-1019-2016.

Brito, M.M., Weber, E.J., Krigger, V.S., Leitzke, F.P., 2016. Analysis of landslide conditioning

factors in Porto Alegre municipality based on historical data. *Revista Brasileira de Cartografia* 68, 1853-1872.

Burrough, P.A., McDonnell, R.A., 1998. Principles of Geographical Information Systems, 1 ed., Oxford University Press, New York.

Carrara, A., Guzzetti, F., 1999. Use of GIS technology in the prediction and monitoring of landslide hazard. *Natural Hazards* 20, 117-135. doi:10.1023/A:1008097111310.

Di Martire, D., De Rosa, M., Pesce, V., Santangelo, M.A., Calcaterra, D., 2012. Landslide hazard and land management in high-density urban areas of Campania region, Italy. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 12, 905-926. doi:10.5194/nhess-12-905-2012.

Dragičević, S., Lai, T., Balram, S., 2015. GIS-based multicriteria evaluation with multiscale analysis to characterize urban landslide susceptibility in data-scarce environments. *Habitat International* 45, 114-125. doi: 10.1016/j.habitatint.2014.06.031.

Eastman, J.R., 2009. Idrisi Taiga: Guide to GIS and image processing, 1 ed., Clark Labs, Worcester.

Feizizadeh, N., Blaschke, T., Nazmfar, H., Moghaddam, M.H.R., 2013. Landslide susceptibility mapping for the Urmia Lake basin, Iran: a multi-criteria evaluation approach using GIS. *International Journal of Environmental Research* 7, 319-336. doi:10.1007/s11069-012-0463-3.

Feizizadeh, B., Jankowski, P., Blaschke, T.A., 2014. GIS based spatially-explicit sensitivity and uncertainty analysis approach for multi-criteria decision analysis. *Computer & Geosciences* 64, 81-95. doi:10.1016/j.cageo.2013.11.009.

Fell, R., Corominas, J., Bonnard, C. 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. doi:10.1016/j.enggeo.2008.03.014.

Fernandes, N.F., Guimarães, R.F., Gomes, R.A. T., Vieira, B.C., Montgomery, D.R., Greenberg, H., 2001. Condicionantes geomorfológicos dos deslizamentos nas encostas: avaliação de metodologias e aplicação de modelo de previsão de áreas susceptíveis. *Revista Brasileira de Geomorfologia* 2, 51-71.

Fujimoto, N.S.V.M., 2002. Implicações ambientais na área metropolitana de Porto Alegre: um estudo geográfico com ênfase na geomorfologia urbana. São Paulo. GEOUSP: Espaço e Tempo [Online], 12. Disponível: www.geografia.fflch.usp.br/publicacoes/Geous



- p/Geosp12/Geosp12\_NinaFujimoto.htm.  
Acesso: 14 dez. 2016.
- Gorsevski, P.V., Jankowski, P., Gessler, P.E., 2006. An heuristic approach for mapping landslide hazard by integrating fuzzy logic with analytic hierarchy process. *Control and Cybernetics* 35, 121-146.
- Günther, A., Reichenbach, P., Malet, J.P., Van Den Eeckhaut, M., Hervás, J., Dashwood, C., Guzzetti, F., 2012. Tier-based approaches for landslide susceptibility assessment in Europe. *Landslides* 10, 529-546. doi:10.1007/s10346-012-0349-1.
- Günther, A., Van Den Eeckhut, M., Malet, J.P., Reichenbach, P., Hervás, J., 2014. Climate-physiographically differentiated Pan-European landslide susceptibility assessment using spatial multi-criteria evaluation and transnational landslide information. *Geomorphology* 224, 69-85. doi: 10.1016/j.geomorph.2014.07.011.
- Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M., Reichenbach, P., 1999. Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology* 31, 181-216. doi:10.1016/S0169-555X(99)00078-1.
- Hasenack, H., Weber, E.J., Macuzzo, S. (Orgs.), 2008. Diagnóstico ambiental de Porto Alegre: geologia, solos, drenagem/ocupação e paisagem, 1 ed., SEMA, Porto Alegre.
- Hasenack, H., Weber, E.J., Lucatelli, L.M.L. (Orgs.), 2010. Base altimétrica vetorial continua do município de Porto Alegre-RS na escala 1:1.000 para uso em sistemas de informação geográfica, 1 ed., Editora da UFRGS, Porto Alegre.
- Hasekiogullari, G.D., Ercanoglu, M., 2012. A new approach to use AHP in landslide susceptibility mapping: a case study at Yenice (Karabuk, NW Turkey). *Natural Hazards* 63, 1157-1179. doi:10.1007/s11069-012-0218-1.
- Kamp, U., Growley, B.J., Khattak, G.A., Owen, L.A., 2008. GIS-based landslide susceptibility mapping for the 2005 Kashmir earthquake region. *Geomorphology* 101, 533-543. doi: 10.1016/j.geomorph.2008.03.003.
- Kanungo, D.P., Arora, M.K., Sarkar, S., Gupta, R. P., 2006. A comparative study of conventional ANN, black box, fuzzy and combined neural and fuzzy weighting procedures for landslide susceptibility zonation in Darjeeling Himalayas. *Engineering Geology* 85, 347-366. doi:10.1016/j.enggeo.2006.03.004.
- Koester, E., Soliani Jr., E., Leite, J.A.D., Hartmann, L.A., Fernandes, L.A.D., Mcnaughton, N.J., Santos, J.O.S., Oliveira, L., 2001. D. Shrimp U – Pb age for the emplacement of Santana Granite and reactivation of the Porto Alegre suture, southern Brazil. *Journal of South American Earth Sciences* 14, 91-99. doi:10.1016/S0895-9811(01)00004-9.
- Komac, M., 2006. A landslide susceptibility model using the Analytical Hierarchy Process method and multivariate statistics in perialpine Slovenia. *Geomorphology* 74, 17-28. doi: 10.1016/j.geomorph.2005.07.005.
- Lee, S., Min, K., 2001. Statistical analysis of landslide susceptibility at Yongin, Korea. *Environmental Geology* 40, 1095-1113. doi:10.1007/s002540100310.
- Lemes, M.R.T., 2001. Revisão dos efeitos da vegetação em taludes. Dissertação (Mestrado). Porto Alegre, UFRGS.
- 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. doi:10.1016/j.jag.2009.01.003.
- Menegat, R. (Coord.), Porto, M.L., Fernandes, L. A.D., 2006. Atlas ambiental de Porto Alegre, 1 ed., Editora da UFRGS, Porto Alegre.
- Ministério da Integração, 2013. Lista dos 821 municípios com o maior número de ocorrências de desastres naturais. Disponível: <[www.mi.gov.br/pt/c/document\\_library/get\\_file?uuid=51c80bb2-9bf9-4193-9eb2-1ba2cb2937e2&groupId=10157](http://www.mi.gov.br/pt/c/document_library/get_file?uuid=51c80bb2-9bf9-4193-9eb2-1ba2cb2937e2&groupId=10157)>. Acesso: 14 dez. 2016.
- Moura, N.S.V., Dias, T.S., 2012. Elaboração do mapa geomorfológico do município de Porto Alegre – RS. *Ciência e Natura* 34, 113-138.
- Moura, R., Silva, L.A.A., 2008. Desastres naturais ou negligência humana? *Revista Geografar* 3, 58-72.
- Nogueira, A.C.F., Sanson, F., Pessoa, K., 2007. A expansão urbana e demográfica da cidade de Manaus e seus impactos ambientais. In: *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, 8. Anais... INPE, Florianópolis, 5427-5434.
- Pellicani, R., Van Westen, C.J., Spilotro, G., 2014. Assessing landslide exposure in areas with limited landslide information. *Landslides* 11, 463-480. doi:10.1007/s10346-013-0386-4.
- Phillip, R.P., 2008. Geologia. In: Hasenack, H. (Coord.). *Diagnóstico Ambiental de Porto Alegre: geologia, solos, drenagem, vegetação/ocupação e paisagem*, 1 ed., cap. 1. SEMA, Porto Alegre.
- Phillip, R.P., Campos, R.S., 2004. Geologia, petrografia e litogeoquímica dos gnaisses Porto Alegre, RS, Brasil: Implicações geotectônicas. *Revista Pesquisa em Geociências* 31, 79-94.
- Reckziegel, B.W., 2007. Levantamento dos desastres desencadeados por eventos naturais adversos no estado do Rio Grande do Sul no

- período de 1980 a 2005. Dissertação (Mestrado). Santa Maria, UFSM.
- Reckziegel, E.W., 2012. Identificação e mapeamento das áreas com perigo de movimento de massa no município de Porto Alegre, RS. Dissertação (Mestrado). Porto Alegre, UFRGS.
- Reis, S., Yalcin, A., Atasoy, M., Nisanci, R., Bayrak, T., Erduran, M., Sancar, C., Ekercin, S., 2012. Remote sensing and GIS-based landslide susceptibility mapping using frequency ratio and analytical hierarchy methods in Rize province (NE Turkey). *Environmental Earth Sciences* 66, 2063-2073. doi:10.1007/s12665-011-1432-y.
- Roodposhti, M.S., Rahimi, S., Beglou, M.J., 2014. PROMETHEE II and fuzzy AHP: an enhanced GIS-based landslide susceptibility mapping. *Natural Hazards* 73, 77-95. doi:10.1007/s11069-012-0523-8.
- Ruff, M., Czurda, K., 2008. Landslide susceptibility analysis with a heuristic approach in the Eastern Alps (Vorarlberg, Austria). *Geomorphology* 94, 314-324. doi:10.1016/j.geomorph.2006.10.032.
- Saaty, T.L., 1977. A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of the Mathematical Psychology* 15, 234-281. doi:doi.org/10.1016/0022-2496(77)90033-5.
- Saaty, T.L., 2008. Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*. 1. doi: 10.1504/IJSSci.2008.01759.
- Soeters, R., Van Westen, C.J., 1996. Slope stability: recognition, analysis and zonation. In: Turner, A. K., Schuster, R. L. *Landslides investigation and mitigation*. Special Report, Transportation Research Board, National Research Council, Washington.
- Vanacôr, R.N., Rolim, S.B.A., 2012. Mapeamento da suscetibilidade a deslizamentos usando técnicas de estatística bivariada e sistema de informações geográficas na região nordeste do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Geomorfologia* 13, 15-28.
- Villwock, J.A., Tomazelli, L.J., 1995. Geologia costeira do Rio Grande do Sul. *Notas Técnicas*. CECO/UFRGS, Porto Alegre.
- Zadeh, L.A., 1965. Fuzzy sets. *Information and Control* 8, 338-353. doi:10.1016/S0019-9958(65)90241-X.
- Zagonari, F., Rossi, C., 2013. A heterogeneous multi-criteria multi-expert decision-support system for scoring combinations of flood mitigation and recovery options. *Environmental Modelling and Software* 49, 152-165. doi:10.1016/j.envsoft.2013.08.004.
- Zêzere, J.L., Rodrigues, M.L., Reis, E., Garcia, R., Oliveira, S., Vieira, G., Ferreira, A.B., 2004. Spatial and temporal data management for the probabilistic landslide hazard assessment considering landslide typology. In:

Lacerda, W. A., Ehrlich, M., Fontoura, S. A. B., Sayão, A. S. F. (Ed). Landslides: evaluation & stabilization, 1 ed., Taylor & Francis Group, Londres.

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. doi:10.1016/S0303-2434(01)85020-0.

Zhu, A.B., Wang, R., Qiao, J., Qin, C.Z., Chen, Y., Liu, J., Du, F., Lin, Y., Zhu, T., 2014. An expert knowledge-based approach to landslide susceptibility mapping using GIS and fuzzy logic. *Geomorphology* 214, 128-138. doi:10.1016/j.geomorph.2014.02.003.