

Análise Determinística Aplicada ao Mapeamento de Suscetibilidade à Movimentos de Massa

Gustavo Bourdot Back

Bolsista, Centro de Estudos e Pesquisas em Engenharia e Defesa Civil (Ceped/UFSC), Florianópolis, Brasil, gustavoback@yahoo.com.br

Rafael Augusto dos Reis Higashi

Professor, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, Brasil, rafael.higashi@ufsc.br

Vivian da Silva Celestino Reginato

Professora, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, Brasil, vivian.celestino@ufsc.br

RESUMO: O objetivo do trabalho é apresentar o mapeamento de suscetibilidade à movimentos de massa rasos para o município de Águas Mornas, localizado na Grande Florianópolis, em Santa Catarina. Para tanto, realizou-se, por meio da análise determinística da estabilidade global em taludes infinitos, a simulação de fatores de segurança para estabelecer as classes de suscetibilidade de acordo com as declividades e os parâmetros das unidades geotécnicas definidas. Os dados topográficos foram obtidos a partir de Modelo Digital de Terreno, as unidades geotécnicas da sobreposição das camadas de pedologia e geologia, e os parâmetros geotécnicos de revisão de literatura específica. Com base no mapeamento resultante, constatou-se que 58% do território está classificado em suscetibilidade muito alta, 26% em baixa, 9% em moderada, e 7% em alta. Destaca-se que o predomínio do maior grau de suscetibilidade se deu em virtude do método aplicado, que considerou a posição do lençol freático e parâmetros geotécnicos críticos, e das características locais de relevo, pedologia e geologia.

PALAVRAS-CHAVE: Gestão de Riscos de Desastres, Deslizamentos, Gestão territorial, Geotecnia.

ABSTRACT: The objective of this work is to present the mapping of susceptibility to shallow mass movements for the municipality of Águas Mornas, located in the Grande Florianópolis region, in Santa Catarina. To this end, deterministic analysis of global stability on infinite slopes was performed to simulate safety factors to establish susceptibility classes according to slope angles and parameters of defined geotechnical units. Topographic data were obtained from a Digital Terrain Model, geotechnical units from the overlay of pedology and geology layers, and geotechnical parameters from specific literature review. Based on the resulting mapping, it was found that 58% of the territory is classified as very high susceptibility, 26% as low, 9% as moderate, and 7% as high. It is noteworthy that the predominance of the highest degree of susceptibility was due to the applied method, which considered the position of the water table and critical geotechnical parameters, as well as local characteristics of relief, pedology, and geology.

KEYWORDS: Landslides, Susceptibility, Territorial management, Geotechnics.

1 INTRODUÇÃO

Entre os desastres que mais geram impactos às comunidades e comprometem a resiliência de estruturas, destacam-se os movimentos de massa. Estima-se, de acordo com os dados do Atlas Digital de Desastres no Brasil, que entre 1991 e 2022, estes desastres afetaram pelo menos 4 milhões de pessoas e causaram prejuízos econômicos acima de R\$ 13 bilhões no país (Brasil, 2023).

Além da complexidade no gerenciamento do desastre, uma vez que se trata de uma ocorrência associada a danos diretos à vida e/ou às infraestruturas essenciais, como moradias e estradas, os movimentos de massa configuram um grande desafio à gestão de riscos, principalmente sob o olhar da crescente de áreas urbanas densamente ocupadas irregularmente.

Neste contexto, o mapeamento de suscetibilidade é uma demanda de elevada importância no que tange as ações de planejamento e gestão ambiental, territorial e de riscos (Silveira *et al.*, 2014). Por meio dele é possível compreender sistemicamente os aspectos topográficos e geotécnicos que influenciam os movimentos de massa, assim como definir medidas para prevenção e mitigação dos riscos correspondentes.

Diante do exposto, o presente estudo tem como objetivo apresentar o mapeamento de suscetibilidade à movimentos de massa rasos para o município de Águas Mornas, localizado na região da Grande Florianópolis, no estado de Santa Catarina. Este é um município que carece de apoio na gestão territorial voltada à suscetibilidade de movimentos de massa, visto que possui um histórico de ocorrências que impactam tanto a área urbana em expansão, quanto o traçado de uma das principais rodovias do estado, a BR-282. Para tanto, foi empregado um mapeamento baseado na análise determinística da estabilidade global em taludes infinitos, que por sua vez estabeleceu fatores de segurança a partir de parâmetros topográficos e geotécnicos.

2 ANÁLISE DETERMINÍSTICA DE ESTABILIDADE DE TALUDES INFINITOS

Em um talude infinito, a superfície potencial de ruptura se apresenta paralelamente à superfície do terreno, o que torna o solo suscetível a movimentos de massa rasos (Huller *et al.*, 2022). Para garantir a sua estabilidade, a análise determinística se baseia no coeficiente de segurança, que para Dyminski (2007) pode ser o fator que minora os parâmetros de resistência ao cisalhamento em termos de tensões efetivas ou totais; que estabelece a relação entre os momentos resistente e atuante para superfície de ruptura circular; a relação entre forças resistente e atuante; ou ainda, a relação entre resistência ao cisalhamento do solo e tensões cisalhantes atuantes no talude.

O método mais usual para este tipo de análise é o do equilíbrio limite, que considera o equilíbrio entre a resistência ao cisalhamento do solo e as tensões cisalhantes atuantes no talude. Neste caso, o fator de segurança é definido por meio dos critérios de ruptura de Mohr-Coulomb, que fornecem a resistência ao cisalhamento a partir de parâmetros de coesão, ângulo de atrito e tensão normal (Guaragna, 2020).

3 MATERIAIS E MÉTODO

O estudo foi orientado conforme o fluxograma apresentado na Figura 1.

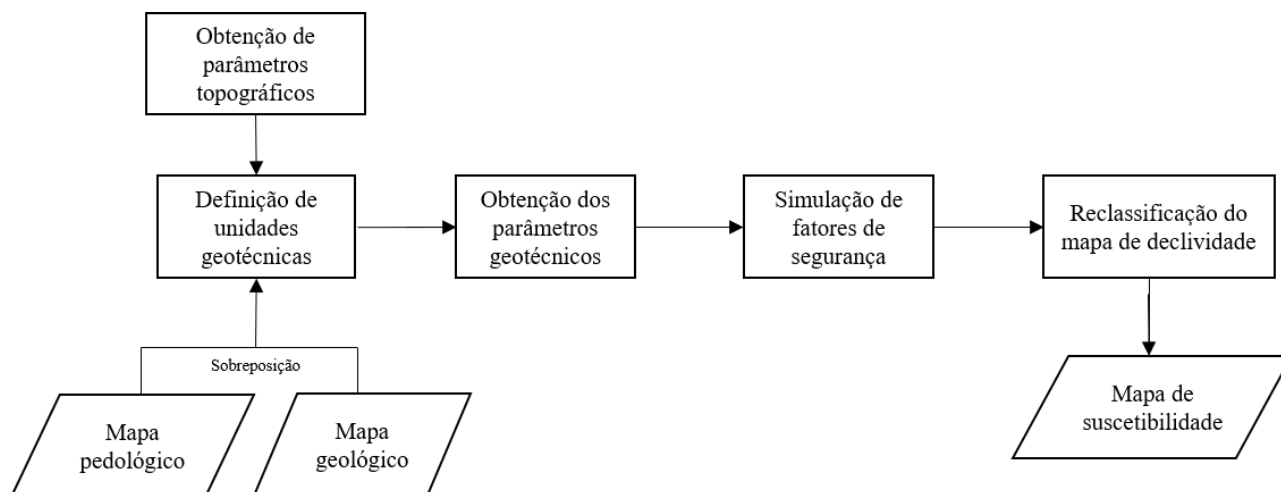


Figura 1. Fluxograma do método do estudo

3.1 Obtenção dos parâmetros topográficos

O Modelo Digital de Terreno (MDT), em escala 1:10.000, foi gerado a partir do processamento matricial das curvas de nível fornecidas pelo Serviço Geológico Brasileiro – CPRM como subproduto das Cartas de

Suscetibilidade a Movimentos Gravitacionais de Massa e Inundações. A partir do MDT, definiram-se em formato matricial (*raster*) as declividades do território.

3.2 Obtenção das unidades geotécnicas

As unidades geotécnicas foram obtidas a partir da sobreposição das camadas vetoriais de pedologia (escala 1:500.000) e geologia (1:250.000), ambas fornecidas pelo Serviço Geológico Brasileiro – CPRM como subprodutos das Cartas de Suscetibilidade a Movimentos Gravitacionais de Massa e Inundações.

3.3 Obtenção dos parâmetros geotécnicos

Os parâmetros geotécnicos considerados no estudo referem-se às variáveis de resistência ao cisalhamento dos solos, isto é, coesão (c') e ângulo de atrito (ϕ), e aos valores de massa específica natural (γ_{nat}) e saturada (γ_{sat}). Estes foram definidos para as unidades geotécnicas identificadas na área de estudo, e obtidos a partir da revisão da literatura de Guessier (2013), Higashi *et al.* (2015), Sbroglia (2015), Christ (2019) e Fornasa, Espíndola e Florisbal (2019). Na impossibilidade de definir parâmetros para unidades geotécnicas específicas, optou-se por simplificações que adotaram os valores mais críticos de coesão e ângulo de atrito para uma mesma tipologia pedológica.

3.4 Simulação dos fatores de segurança

As simulações dos fatores de segurança de cada unidade geotécnica foram realizadas a partir de uma modelagem que considerou, para cada unidade geotécnica, uma seção de talude com inclinações de 10, 15, 20, 25 e 30 graus, e com a posição do lençol freático acompanhando a superfície. A análise utilizada foi a de estabilidade global, com superfície circular e método de cálculo rígido *Janbu*.

Com os fatores calculados para cada cenário, obteve-se a equação de regressão da reta, da qual foi possível definir as declividades limites para suscetibilidade baixa ($FS \geq 1,50$); moderada ($1,50 < FS \leq 1,30$); alta ($1,30 < FS \leq 1,15$); e muito alta ($FS < 1,15$). Estas classes foram estabelecidas a partir dos fatores de segurança propostos para os métodos baseados no equilíbrio-limite na NBR 11682 em sua primeira edição (ABNT, 1991).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização da área de estudo

Águas Mornas é um município com área de 326,66 km² e população de 6.743 habitantes, localizado na Grande Florianópolis (Figura 2), em Santa Catarina. De acordo com levantamento do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2019), a cidade possui apenas 2,63 km² de área urbanizada, o que indica um território predominantemente rural.

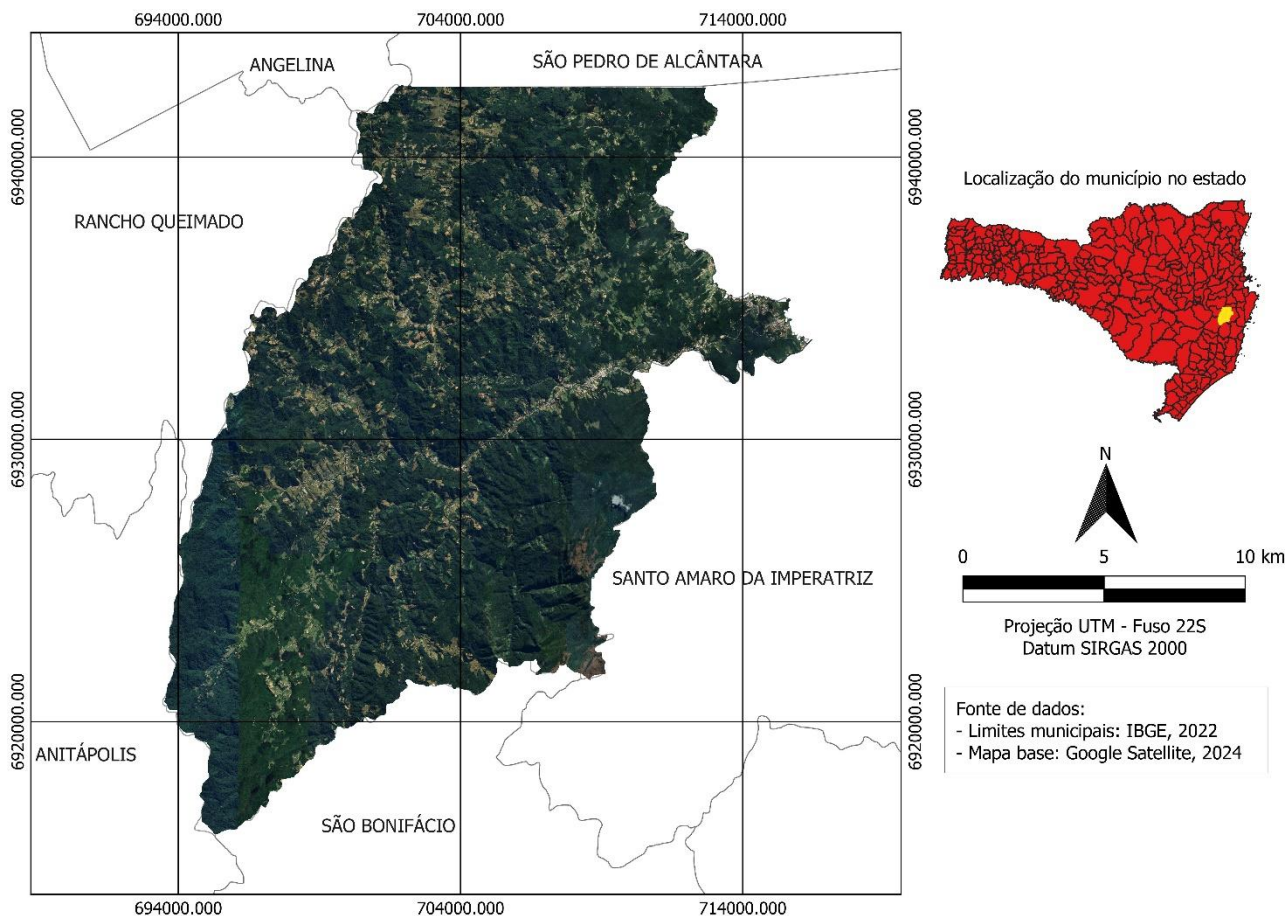


Figura 2. Mapa de localização do município de Águas Mornas (SC)

De acordo com dados do Atlas Digital de Desastres no Brasil (Brasil, 2023), o município registrou 32 ocorrências de 1992 a 2023. Estas causaram impactos econômicos de R\$ 48,9 milhões, sendo R\$ 26,3 milhões de prejuízos privados, referentes às atividades econômicas como agricultura e pecuária; R\$ 19,2 milhões relacionados a danos materiais às obras de infraestrutura pública e de habitação; e R\$ 3,4 milhões de prejuízos públicos quanto a manutenção de serviços essenciais como abastecimento de água potável e limpeza para desobstrução de vias.

Em relação aos movimentos de massa, o órgão de proteção e defesa civil municipal classificou dois desastres com esta tipologia em específico: um em 2017, e outro em 2020. A partir dos registros no Sistema Integrado de Informações sobre Desastres (S2ID), constatou-se a tipologia em outras nove ocorrências, estas classificadas como enxurradas e chuvas intensas.

Das ocorrências registradas, descrevem-se danos diretos em decorrência dos movimentos de massa em diversos bairros do município, o que indica uma distribuição dispersa pelo território. Contudo, nota-se o histórico significativo em localidades de expansão urbana, como Centro, Santa Cruz da Figueira e Vargem Grande; e em localidades que comportam o traçado das rodovias BR-282 (Figura 3) e SC-435, as quais possuem constante fluxo intenso, e são fundamentais à logística social e econômica do município e região.



Figura 3. Movimento de massa na BR-282, em Águas Mornas. Fonte: CSC, 2022.

4.2 Caracterização das unidades geotécnicas

De 22 unidades geotécnicas identificadas na área de estudo, 10 foram adotadas no mapeamento. A Tabela 1 apresenta os valores de parâmetros geotécnicos para as unidades adotadas: Cambissolo de substrato Complexo Águas Mornas (Ccag), Cambissolo de substrato granito (Cg), Cambissolo de substrato granitoide (Cgd), Cambissolo de substrato tonalito (Ct), Glei pouco húmico de substrato granito (GHg), Podzólico vermelho-amarelo de depósitos aluvionares (PVd), Podzólico vermelho-amarelo de substrato granito (PVg), Podzólico vermelho-amarelo de substrato tonalito (PVt), e Solos litólicos de substrato granitoides (SLgd). Além dessas, foi adotada a unidade de Afloramento rochoso de granito (ARg).

Tabela 1. Parâmetros geotécnicos adotados no estudo

Unidade geotécnica	Coesão (kPa)	Ângulo de atrito (°)	γ_{nat} (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	Fonte
Ccag	6,95	31,80	17,30	18,30	Sbroglia, 2015
Cg	5,52	32,20	16,40	17,40	Guesser, 2013
Cgd	2,60	35,57	17,37	18,87	Fornasa, Espíndola e Florisbal, 2019
Ct	8,20	28,70	16,80	18,30	Higashi <i>et al.</i> , 2015
GHg	3,86	33,00	17,40	18,40	Guesser, 2013
PVd	13,40	30,20	15,40	16,90	Higashi <i>et al.</i> , 2015
PVg	10,24	30,00	15,30	16,30	Guesser, 2013
PVt	8,20	28,70	16,80	18,30	Higashi <i>et al.</i> , 2015
SLgd	8,65	21,18	19,10	20,60	Christ, 2019

4.3 Mapeamento de suscetibilidade

A partir das simulações de fatores de segurança, obteve-se o mapa de suscetibilidade apresentado na Figura 4. Nota-se o predomínio da classe de suscetibilidade muito alta, em vermelho no mapa, o que de fato era esperado em virtude do método aplicado e das características locais de relevo, pedologia e geologia. Destaca-se que dentro do método aplicado, a posição do lençol freático e os parâmetros adotados não foram conservadores, isto é, optou-se por aqueles que indicassem o cenário mais crítico de suscetibilidade.

Em termos de distribuição das classes no território, nota-se que as classes de baixa suscetibilidade são as que apresentam maior densidade de ocupação, como nos bairros Centro e Santa Cruz da Figueira. Entretanto, há de se observar os casos, nessas e em outras localidades, em que a ocupação se dá na área de baixa suscetibilidade, porém no limite de áreas com suscetibilidade alta ou muito alta. O mesmo é observado nos traçados das rodovias BR-282 e SC-435, que apesar de localizados predominantemente em áreas de baixa suscetibilidade, acompanham de forma imediata taludes classificados em suscetibilidade muito alta.

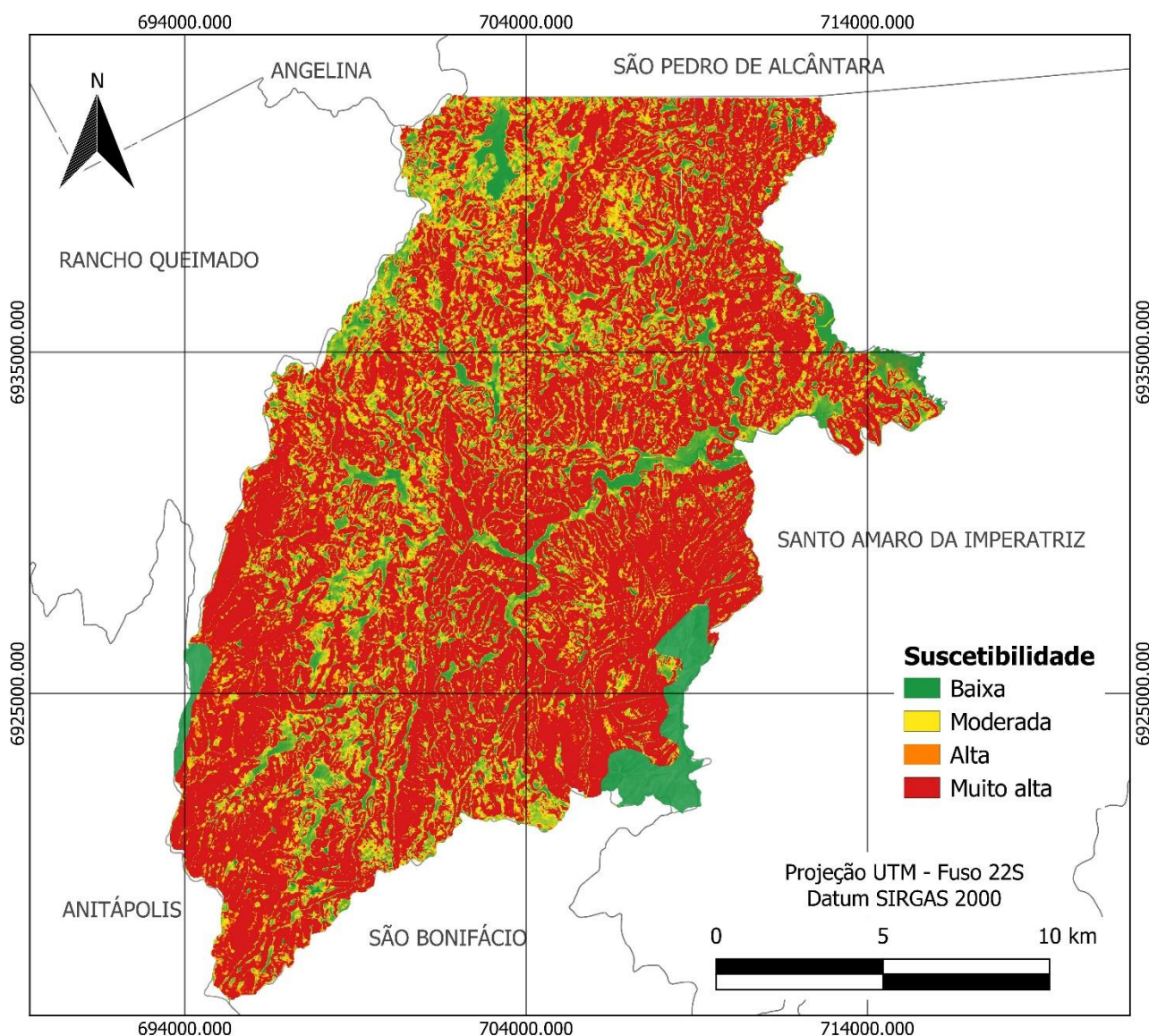


Figura 4. Mapa de suscetibilidade a movimentos de massa rasos do município de Águas Mornas (SC)

As áreas das classes de suscetibilidade para cada unidade geotécnica são as apresentadas na Tabela 2. Destaca-se que 58% do território está classificado em suscetibilidade muito alta, 26% em baixa, 9% em moderada, e 7% em alta. Das unidades geotécnicas, destacam-se as de Afloramentos rochosos de granito (ARg) e Podzólico vermelho-amarelo de depósitos aluvionares (PVd), com quase totalidade de suas extensões

classificadas em baixa suscetibilidade; e as de Cambissolo de substrato granito (Cg) e Solos litólicos de substrato granitoides (SLgd), que respectivamente apresentar 71% e 81% de extensão classificada em suscetibilidade muito alta.

Tabela 2. Áreas de suscetibilidade identificadas no estudo

Unidade geotécnica	Área de suscetibilidade (km ²)				Total
	Baixa	Moderada	Alta	Muito alta	
ARg	8,297	0,000	0,000	0,000	8,30
Ccag	15,460	5,110	4,714	26,286	51,57
Cg	15,383	6,095	5,032	63,723	90,23
Cgd	6,916	1,693	1,614	10,062	20,28
Ct	17,169	6,628	5,315	25,574	54,69
GHg	2,661	0,424	0,336	2,417	5,84
PVd	1,060	0,006	0,003	0,012	1,08
PVg	12,673	4,526	4,036	31,186	52,42
PVt	4,060	1,434	1,117	5,312	11,92
SLgd	1,919	1,945	2,205	24,259	30,33
Total	85,598	27,861	24,372	188,830	326,66

5 CONCLUSÕES

O estudo teve como objetivo apresentar o mapeamento de suscetibilidade à movimentos de massa rasos para o município de Águas Mornas. O mapeamento foi baseado na identificação de unidades geotécnicas a partir da sobreposição de camadas de pedologia e geologia, e na simulação de fatores de segurança a partir de análise determinística da estabilidade global em taludes infinitos.

Identificaram-se 22 unidades geotécnicas no território, das quais 10 foram caracterizadas a partir dos parâmetros de coesão, ângulo de atrito e massa específica, e adotadas no mapeamento. Para cada uma, definiram-se classes de suscetibilidade por meio da relação entre declividades, obtidas pelo processamento matricial de curvas de nível, e fatores de segurança, simulados a partir de um modelo hipotético.

O mapeamento resultou na classificação de 58% do território em suscetibilidade muito alta, 26% em baixa, 9% em moderada, e 7% em alta. Das unidades geotécnicas adotadas, as de Afloramentos rochosos de granito (ARg) e Podzólico vermelho-amarelo de depósitos aluvionares (PVd) se destacam pela baixa suscetibilidade, enquanto as de Cambissolo de substrato granito (Cg) e Solos litólicos de substrato granitoides (SLgd) pela suscetibilidade muito alta.

Observou-se que o território classificado em baixa suscetibilidade é o mais densamente ocupado. Entretanto, constaram-se casos em que a ocupação se dá em áreas de baixa suscetibilidade limítrofes a áreas de suscetibilidade muito alta, o que indica a exposição ao movimento de massa caso esse seja consideravelmente extenso. O mesmo raciocínio se aplica ao traçado das rodovias BR-282 e SC-435, que ocupam áreas de baixa suscetibilidade, mas estão suscetíveis à extensão das ocorrências nos taludes imediatos.

O mapeamento resultante se mostrou adequado devido às condições locais de relevo, pedologia e geologia, ao método e aos parâmetros adotados. Sabe-se que a precisão do mapeamento está diretamente ligada à qualidade dos dados de entrada, logo, a opção por simplificações das unidades geotécnicas, e por parâmetros menos conservadores, conduziu ao cenário mais crítico de suscetibilidade muito alta.

Por fim, entende-se que este é um estudo preliminar passível de continuidade, tanto para o município em questão, quanto para os demais que possuam esta demanda no que tange a ocorrências dos movimentos de massa. Diante das limitações, sugere-se como alternativa expedições a campo e ensaios específicos para obtenção de parâmetros geotécnicos mais precisos, a otimização dos parâmetros topográficos a partir de dados espaciais de maior precisão e qualidade, e a otimização do modelo adotado para a simulação dos fatores de segurança.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1991). NBR 11682. *Estabilidade de taludes*. Rio de Janeiro.
- BRASIL. Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional. Secretaria de Proteção e Defesa Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Centro de Estudos e Pesquisas em Engenharia e Defesa Civil. *Atlas Digital de Desastres no Brasil*. Brasília: MIDR, 2023.
- CHRIST, C. E. *Mapeamento geotécnico e análise da suscetibilidade a deslizamentos na Ilha de Santa Catarina*. 2019. 191 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.
- CORREIO DE SANTA CATARINA (CSC). *BR-282 e Serra do Rio do Rastro têm novos deslizamentos*. 2022. Disponível em: <https://www.correiosc.com.br/br-282-e-serra-do-rio-do-rastro-tem-novos-deslizamentos/>. Acesso em: 19 mar. 2024.
- DYMINSKI, A. S. *Noções de estabilidade de taludes e contenções* – Notas de aula de estabilidade de taludes. 2007. Notas de aula. 28p.
- FORNASA, T. L.; ESPÍNDOLA, M. da S.; FLORISBAL, L. M. Mapeamento Geológico-Geotécnico e Análise de Suscetibilidade a Movimentos de Massa em Braço do Norte – SC. In: XII SIMPÓSIO DE PRÁTICAS DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA DA REGIÃO SUL, 2019, Joinville. *Anais do GEOSUL 2019*. Joinville: ABMS, 2019. p. 1-10.
- GUARAGNA, G. G. *Mapeamento e análise de suscetibilidade a deslizamentos com base em metodologias 2D e 3D do município de Tijucas – SC*. 2020. 109 f. TCC (Graduação) – Curso de Geologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Florianópolis, 2020.
- GUESSER, L. H. *Elaboração do mapa geotécnico preliminar e mapa de áreas suscetíveis a movimentos de massa do município de Antônio Carlos-SC*. 2013. 168 f. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.
- HIGASHI, R. A. dos R. *et al.* *Mapeamento geotécnico da área de expansão urbana do município de São José*. São José: Laboratório de Mapeamento Geotécnico, Universidade Federal de Santa Catarina, 2015.
- HULLER, J. *et al.* Mapeamento de movimentos de massa rasos na Microbacia do Itacorubi. *Brazilian Journal Of Animal And Environmental Research*, Curitiba, v. 5, n. 3, p. 3355-3366, set. 2022. <http://dx.doi.org/10.34188/bjaerv5n3-060>.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Diretoria de Geociências. Coordenação de Meio Ambiente. *Áreas urbanizadas do Brasil*. Rio de Janeiro: IBGE, 2019.
- SBROGLIA, R. M. *Mapeamento geotécnico e das áreas suscetíveis a deslizamentos na microbacia do Ribeirão Baú, Ilhota/SC*. 2015. 187 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.
- SILVEIRA, C. T. da *et al.* Mapeamento preliminar da suscetibilidade natural a movimentos de massa da Serra do Mar Paranaense apoiado na análise digital do relevo. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, São Paulo, v. 15, n. 1, p. 1-22, abr. 2014. <http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v15i1.366>.