XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.4/108

Resiliência Climática Aplicada à Segurança de Encostas Naturais em Regiões de Chuvas Extremas no RS

Laura Coden Tassinari
Graduanda, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, lauractassinari01@gmail.com

Dêreck Hummel Becher
Mestrando, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, dereckhbecher@gmail.com

Luigi Tavares Gomes
Mestrando, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, goomes_8@hotmail.com

Angelo Dotto Ragagnin Prior
Mestrando, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, angelodrprior@hotmail.com

Magnos Baroni
Professor, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, magnos.baroni@ufsm.br

RESUMO: Os eventos climáticos extremos registrados nos anos de 2024 e 2025 no estado do Rio Grande do Sul evidenciaram a elevada vulnerabilidade de encostas naturais frente a episódios de chuvas intensas e prolongadas. As perdas ambientais, econômicas e, sobretudo, humanas associadas a esses eventos reforçam a necessidade de incorporar o conceito de resiliência climática ao planejamento e à concepção de obras geotécnicas, de modo a assegurar desempenho adequado em cenários de instabilidade crescente. Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo analisar a estabilidade de uma encosta natural localizada no município de Santa Cruz do Sul/RS, região frequentemente afetada por precipitações extremas. Para isso, foram realizadas simulações numéricas considerando diferentes cenários de elevação do lençol freático, com o propósito de avaliar seus efeitos sobre a segurança da encosta. As análises foram desenvolvidas no *software Slide2*, adotando abordagens determinísticas e probabilísticas para a estimativa dos fatores de segurança e para a avaliação das incertezas associadas aos parâmetros geotécnicos. Os resultados indicam uma redução significativa do fator de segurança com a elevação do nível freático, evidenciando a importância de análises que considerem a variabilidade hidrológica e a resiliência das encostas frente a eventos climáticos extremos.

PALAVRAS-CHAVE: Estabilidade de encostas, Resiliência climática, Variabilidades geotécnicas, Elevação do nível freático, Fator de segurança.

ABSTRACT: Extreme climatic events recorded in the state of Rio Grande do Sul during 2024 and 2025 highlighted the high vulnerability of natural slopes to intense and prolonged rainfall, which has triggered recurrent mass movements and landslides. The environmental, economic, and, most importantly, human losses associated with these events reinforce the need to incorporate the concept of climate resilience into the planning and design of geotechnical works, in order to ensure adequate performance under increasingly unstable conditions. In this context, this study aims to analyze the stability of a natural slope located in the municipality of Santa Cruz do Sul/RS, a region frequently affected by extreme rainfall. Numerical simulations were performed considering different scenarios of groundwater level rise, with the objective of evaluating their effects on slope safety. The analyses were carried out using the Slide software, adopting both deterministic and probabilistic approaches to estimate safety factors and assess uncertainties associated with geotechnical parameters. The results indicate a significant reduction in the factor of safety with increasing groundwater levels, highlighting the importance of incorporating analyses that account for hydrological variability and slope resilience under extreme climatic events.

KEYWORDS: Slope stability, Climate resilience, Geotechnical variability, Groundwater level rise, Safety factor.

1 INTRODUÇÃO

Os impactos das mudanças climáticas têm se manifestado de forma cada vez mais intensa e frequente em todas as regiões do mundo, refletindo no aumento da ocorrência de eventos extremos, como a elevação da temperatura global e a intensificação de chuvas atípicas (WMO, 2025). No contexto brasileiro, essa realidade assume particular relevância em função das características climáticas, geológicas e geomorfológicas do território, que tornam extensas áreas suscetíveis a processos de instabilização associados a precipitações intensas e persistentes (IBGE, 2019). No estado do Rio Grande do Sul, os eventos registrados nos anos de 2024 e 2025 evidenciaram a vulnerabilidade de infraestruturas urbanas e rurais, bem como a elevada suscetibilidade de encostas naturais frente a regimes pluviométricos extremos (ANA, 2025).

As chuvas intensas e persistentes configuram-se como os principais agentes desencadeadores de movimentos de massa em encostas naturais (D'ORSI, 2011). A infiltração da água no solo, associada à elevação do nível freático, resulta na perda de sucção em solos não saturados, no aumento das pressões neutras e na consequente redução das tensões efetivas (LAMBE e WHITMAN, 1979). Tais mecanismos contribuem diretamente para a diminuição da resistência ao cisalhamento dos solos, podendo culminar na ruptura da encosta. Em áreas dominadas por solos coluvionares, definidos por Lacerda e Sandroni (1985) como depósitos de granulometrias muito variadas, mobilizados principalmente pela ação da gravidade e acumulados no sopé de taludes íngremes e escarpas rochosas, esses processos assumem maior relevância, especialmente quando associados a eventos de precipitação intensa ao longo de vários dias.

Tradicionalmente, projetos geotécnicos voltados à estabilidade de encostas são desenvolvidos com base em hipóteses estacionárias, nas quais os parâmetros geotécnicos, climáticos e hidrológicos são considerados constantes ao longo da vida útil da obra (ASSIS, 2020). No entanto, esse pressuposto mostra-se cada vez menos compatível com o cenário atual. A adoção de abordagens que desconsideram a variabilidade climática e as incertezas inerentes aos parâmetros geotécnicos pode resultar em projetos incapazes de garantir níveis adequados de segurança frente a condições ambientais adversas (FALCÃO et al., 2020).

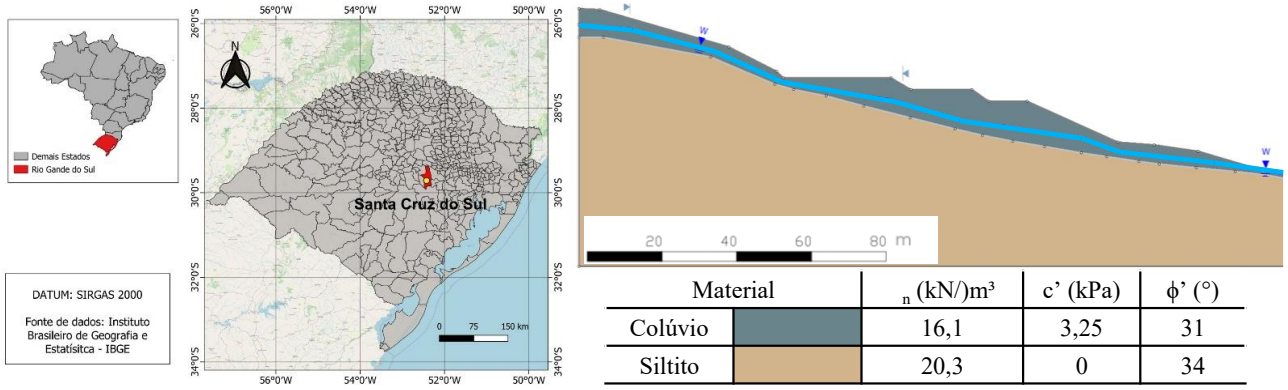
Nesse contexto, o conceito de resiliência climática emerge como um elemento fundamental no âmbito da engenharia geotécnica (FORZIERI et al., 2018). Aplicada à análise de encostas naturais, a resiliência climática refere-se à capacidade do maciço de resistir, adaptar-se e recuperar-se frente a eventos climáticos severos. Essa abordagem pressupõe a incorporação de cenários extremos nos estudos de estabilidade, bem como a consideração das incertezas associadas às propriedades dos materiais e às condições hidrológicas, subsidiando estratégias preventivas de mitigação de riscos.

Diante desse cenário, o presente trabalho tem como foco a análise da estabilidade de uma encosta localizada no município de Santa Cruz do Sul/RS, região que apresenta histórico de movimentos de massa associados a episódios de chuvas prolongadas. Assim, o objetivo desta pesquisa é analisar a segurança de uma encosta natural submetida a diferentes cenários de saturação, por meio de simulações numéricas desenvolvidas no *software Slide2*. O estudo considera metodologias determinísticas e probabilísticas para avaliar a sensibilidade do fator de segurança frente ao aumento do nível freático e para compreender o impacto das incertezas paramétricas no comportamento do maciço. De forma complementar, busca-se ampliar o debate sobre a necessidade de incorporar princípios de resiliência climática no planejamento e na execução de intervenções geotécnicas, especialmente em contextos marcados por eventos pluviométricos extremos.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

O presente estudo foi desenvolvido a partir da análise de uma encosta natural localizada no município de Santa Cruz do Sul, no estado do Rio Grande do Sul (Figura 1 (a)). A geometria do maciço foi definida a partir de seções investigadas em estudos anteriores de Pinheiro et al. (2002), Eisenberger (2003) e Nascimento et al. (2025), representativas de taludes coluvionares típicos da região central do estado, conforme mostra a Figura 1 (b). A escolha dessa encosta está na recorrência de processos de instabilização associados a eventos de precipitações intensas e prolongadas, característica marcante do regime pluviométrico regional. Os valores de peso específico natural (γ_n), ângulo de atrito (ϕ') e coesão (c') usados na modelagem numérica são apresentados na Figura 1 (b), sendo esses determinados nos estudos conduzidos por Pinheiro et al. (2002).



Material		γ_n (kN/)m³	c' (kPa)	ϕ' (°)
Colúvio		16,1	3,25	31
Siltito		20,3	0	34

(a) (b)

Figura 1. (a) Localização e (b) secção da encosta analisada.

O perfil da encosta é constituído por uma camada superficial de solo coluvionar, com espessura variando entre 5 e 10 metros, assentada sobre um substrato de siltito. O solo coluvionar apresenta comportamento fortemente dependente do grau de saturação, com redução expressiva da resistência ao cisalhamento à medida que ocorre a elevação do teor de umidade. O siltito foi considerado como um material de elevada resistência mecânica e baixa permeabilidade.

2.2 Modelagem numérica da encosta

A estabilidade da encosta foi avaliada por meio de análises numéricas baseadas no método de equilíbrio limite, utilizando o *software Slide2*. Com o objetivo de representar os efeitos de diferentes intensidades e durações de eventos pluviométricos extremos na estabilidade da encosta, foram definidos múltiplos cenários associados à variação do nível do lençol freático. A elevação do nível d'água foi adotada como uma hipótese simplificadora nesse trabalho para simular o aumento da saturação por sua maior facilidade na modelagem numérica. Sabe-se que o mecanismo central de instabilidade de encostas está na perda de sucção, sendo sugeridas para trabalhos futuros análises de fluxo transiente acopladas, com curva de retenção e modelo de sucção.

Foram consideradas seis condições distintas, apresentadas na Figura 2: ausência de nível freático (SA), nível freático natural e quatro cenários de elevação progressiva (0,50 m, 1,00 m, 1,50 m e 2,00 m) em relação à condição natural. A escolha por essas elevações foi baseada na avaliação de Nascimento et al. (2025), que estimaram que uma precipitação com intensidade de 50 mm/h, por períodos de 40 a 180 minutos, seria suficiente para gerar tais acréscimos no nível da água. É importante ressaltar que essas condições são compatíveis com as intensidades e durações observadas durante os eventos climáticos extremos que atingiram o Rio Grande do Sul em 2024, validando a relevância das análises realizadas.

A avaliação da estabilidade da encosta foi conduzida por meio de análises determinísticas e probabilísticas. Com as análises determinísticas foi possível a obtenção dos valores de fator de segurança (FS), enquanto as análises probabilísticas permitiram quantificar os efeitos das incertezas associadas às propriedades geotécnicas dos materiais, resultando em valores de probabilidade de falha (PF) e Índice de Confiabilidade (β), analisados sob classificações do *U.S. Army Corps of Engineers* (Tabela 1).

Tabela 1. Classificação da PF pela *U.S. Army Corps of Engineers.*

Desempenho	Alto	Bom	Acima média	Abaixo média	Pobre	Insatisfatório	Perigoso
β	5	4	3	2,5	2	1,5	1
PF (Φ(-β))	0,0000003	0,00003	0,001	0,006	0,023	0,07	0,16

As análises probabilísticas foram conduzidas por meio do método de simulação de Monte Carlo, com 10^5 iterações, no qual a variabilidade dos parâmetros geotécnicos foi incorporada a partir de distribuições normais. Para esse fim, adotaram-se os valores de desvio padrão definidos por Nascimento et al. (2025), obtidos com base em um banco de dados representativo de solos coluvionares do Rio Grande do Sul: 1,49

kN/m³ para o peso específico, 4,72° para o ângulo de atrito e 5,08 kPa para o intercepto coesivo. Baseado no princípio do *Three Sigma Rule*, usou-se o intervalo de três desvios-padrão sobre a média, abrangendo 99,7% dos dados normalmente distribuídos.

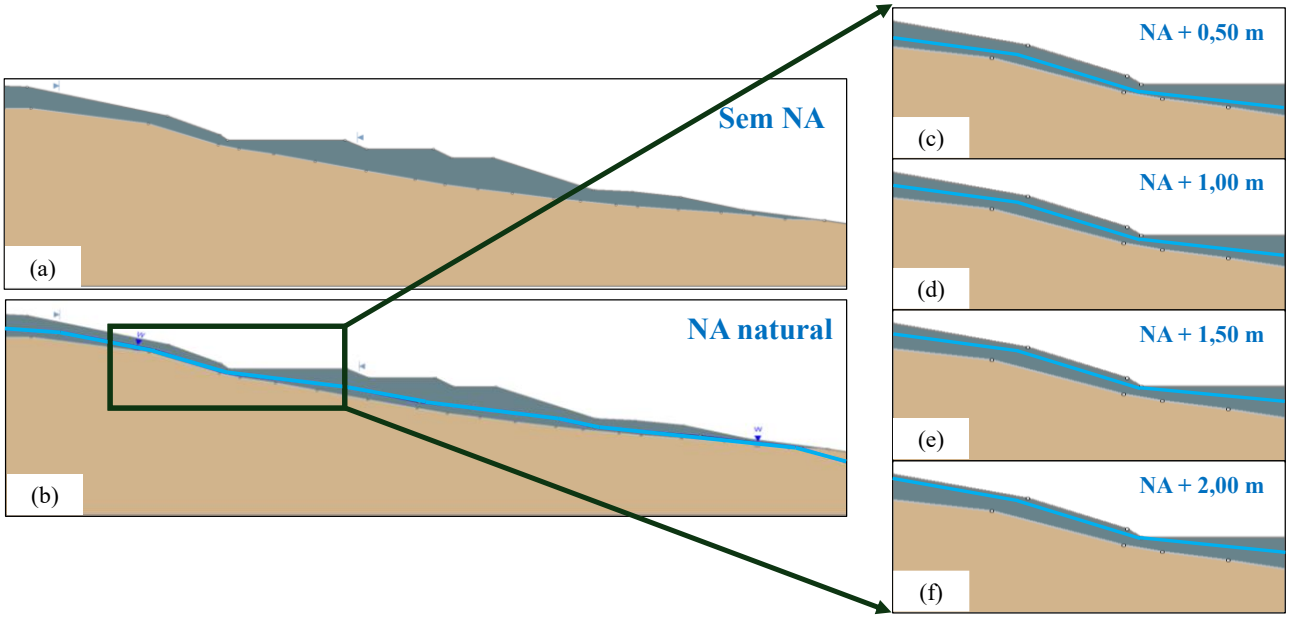


Figura 2. Condições de variação do nível de água: (a) sem nível de água, (b) nível de água natural, (c) nível da água elevado em 0,5 m, (d) nível da água elevado em 1,0 m, (e) nível da água elevado em 1,5 m e (f) nível da água elevado em 2,0 m.

No âmbito das análises de estabilidade, foram empregados os métodos de Bishop Simplificado, Spencer e Morgenstern-Price (GLE), amplamente utilizados na engenharia geotécnica. O método de Bishop Simplificado baseia-se no equilíbrio de momentos e é aplicável a superfícies de ruptura circulares, apresentando elevada eficiência computacional e ampla aceitação prática. Entretanto, por não satisfazer simultaneamente todas as condições de equilíbrio de forças e momentos, sua aplicação foi complementada por métodos mais rigorosos (GERSCOVICH, 2012).

Os métodos de Spencer e GLE satisfazem simultaneamente as condições de equilíbrio de forças e momentos, sendo classificados como métodos rigorosos de equilíbrio limite, aplicáveis à análise de superfícies de ruptura circulares e não circulares. No presente trabalho, foram investigadas superfícies de ruptura circulares e planares, permitindo a avaliação de distintos mecanismos potenciais de ruptura e a comparação do comportamento da encosta sob diferentes geometrias críticas.

3 RESULTADOS

A Figura 3 apresenta a região crítica de ruptura encontrada para todas as análises efetuadas e a Figura 4 demonstra os valores de FS e PF obtidos para cada cenário analisado, em relação aos diferentes métodos de cálculo empregados.

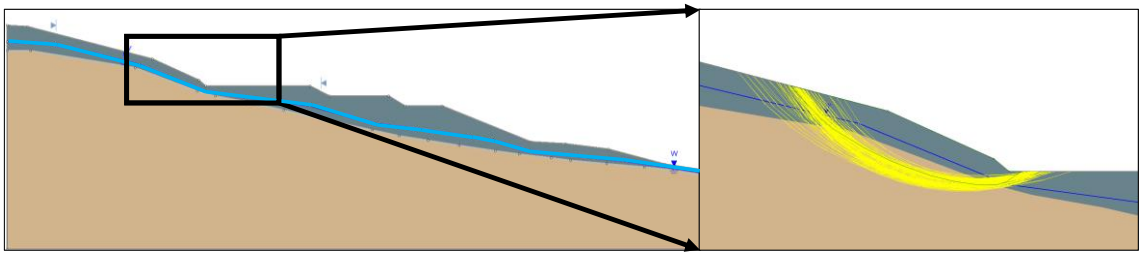


Figura 3. Região crítica de ruptura.

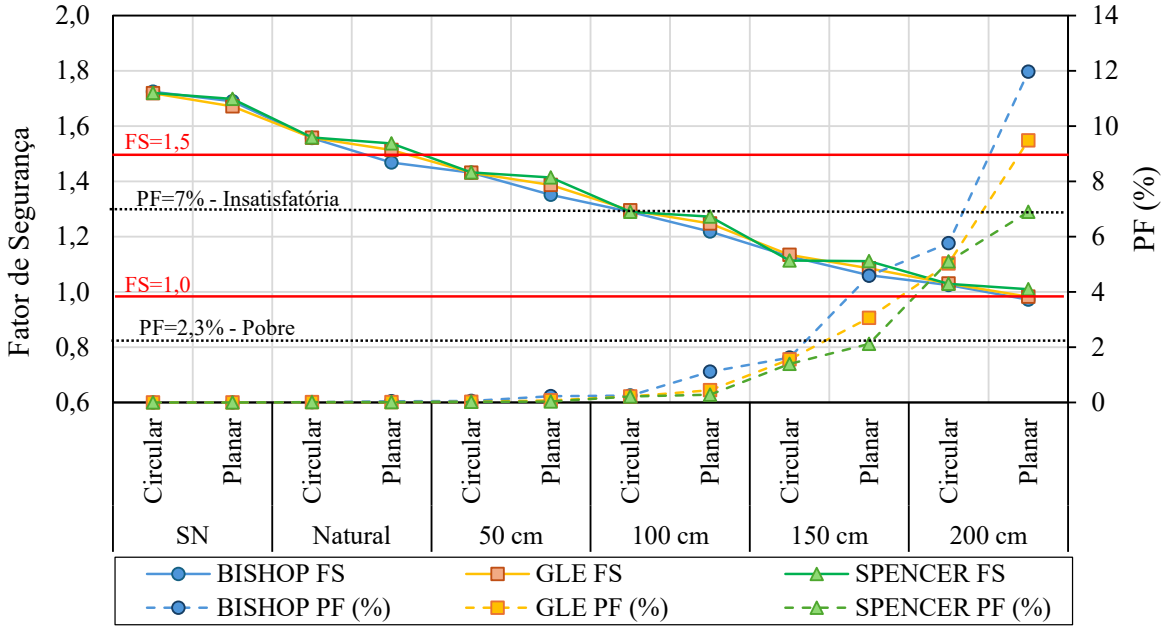


Figura 4. Valores de FS e PF dos diferentes cenários analisados.

No modelo da encosta desconsiderando o nível de água, todas as análises apresentaram valores de FS em torno de 1,70 e probabilidades de falha próximas a zero. Com a inserção do nível de água natural da encosta, os valores de FS diminuem, mas ainda permanecem superiores a 1,50 nas análises que consideraram rupturas circulares, enquanto que, na análise de ruptura não circular, para o método de Bishop Simplificado, esse valor é inferior a 1,50.

Em relação aos métodos de cálculo, observa-se grande similaridade entre os resultados de FS, especialmente para as análises com rupturas circulares. Entretanto, nas análises que consideraram rupturas não circulares, os valores obtidos pelo método de Bishop Simplificado são, de modo geral, inferiores aos demais. Esse comportamento observado pode ser justificado uma vez que o método assume maiores simplificações do que métodos mais rigorosos, além de não ser indicado para análises de superfícies de ruptura não circulares. Assim, conforme a geometria e as condições de contorno analisadas, pode subestimar ou superestimar valores de FS.

Conforme a elevação do nível de água, é notável uma diminuição acentuada nos valores de FS obtidos nos métodos determinísticos, uma vez que a saturação do solo promove o aumento das pressões neutras, reduz as tensões efetivas e, consequentemente, diminui a resistência ao cisalhamento, sobretudo pela perda da coesão aparente em solos não saturados. Nos métodos probabilísticos, os valores de PF crescem significativamente a partir das análises com nível de água elevado em 1,5 m e 2,0 m. Na maioria desses casos, o valor de PF mostrou-se como “Pobre” ou “Insatisfatório”, conforme a classificação do *U.S. Army Corps of Engineers*, sendo os maiores valores obtidos, de modo geral, para o método de Bishop Simplificado. As maiores dispersões nos resultados de PF ocorreram nas análises que consideraram superfícies de ruptura não circulares. Outro ponto a ser destacado refere-se aos resultados obtidos na abordagem determinística para o cenário de NA + 2,0 m. Para superfícies de ruptura não circulares, os métodos de Bishop Simplificado e GLE apresentaram valores de fator de segurança inferiores à unidade, indicando um cenário de ocorrência de ruptura. Nesses casos, as probabilidades de falha obtidas foram de 11,97 % e 9,48 % para os métodos de Bishop e GLE, respectivamente, sendo classificadas como “Insatisfatórios”. Esse cenário, de FS<1,0 e PF<100%, reflete a variabilidade e as incertezas associadas aos parâmetros geotécnicos usados na modelagem em torno de sua média.

Adicionalmente, observa-se um crescimento acentuado das probabilidades de falha nos cenários de NA+1,5 m e NA+2,0 m, o que evidencia a elevada sensibilidade da encosta às variações do regime hidrológico. Esse comportamento indica que uma condição inicialmente considerada estável pode evoluir rapidamente para um estado instável à medida que ocorre a elevação do nível de água.

A Figura 5 apresenta a correlação entre os resultados de PF e FS, evidenciando uma relação já conhecida na literatura de comportamento inversamente proporcional e não-linear entre as variáveis, na qual a elevação

da probabilidade de falha está associada à redução do fator de segurança, com valores próximos ou inferiores à unidade nos cenários mais críticos. Fatores de segurança entre 1,2 e 1,3 exibem, em análises probabilísticas, valores de PF já próximos a 1,0%, sendo classificados como "Abaixo da média". Fatores de segurança entre 1,0 e 1,1 são correlacionados com PF na faixa de 2 a 7%, sendo classificados como "Pobre" a "Insatisfatório". Os diferentes métodos de cálculo empregados nas análises alinham-se de maneira consistente à mesma curva de tendência, validando o comportamento global do sistema.

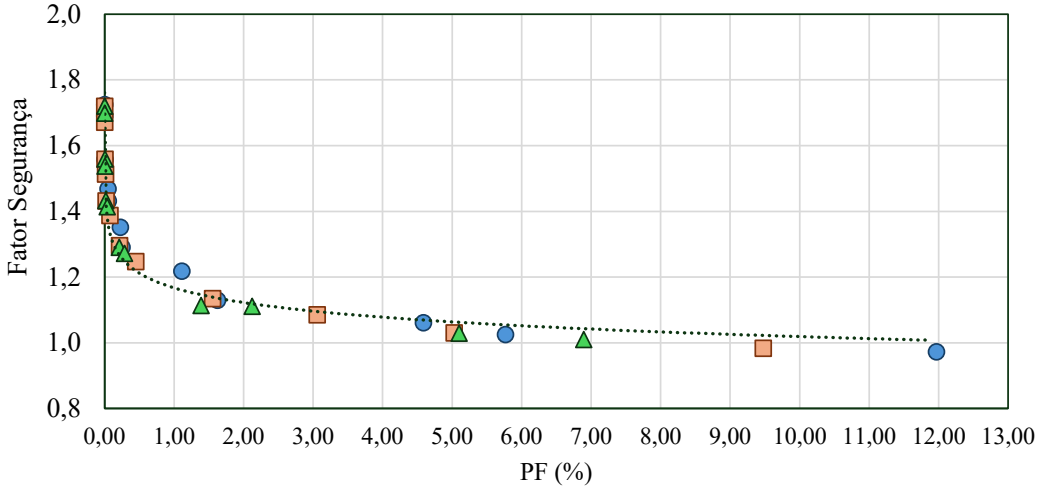


Figura 5. Correlações entre PF e FS.

A Figura 6 ilustra a convergência dos resultados em função do número de simulações de Monte Carlo realizadas para o Cenário 200 cm, utilizando o método GLE. Na Figura 6(a), observa-se a evolução da PF, a qual apresenta forte instabilidade e oscilações acentuadas nas primeiras centenas de iterações, estabilizando-se assintoticamente em aproximadamente 9,48% a partir de 10^4 simulações. Comportamento análogo de convergência é verificado na Figura 6(b) para o FS, cujos valores flutuam inicialmente na faixa de 1,15 a 1,25 antes de convergirem de forma consistente para o valor médio estabilizado de aproximadamente 1,24. Esse comportamento conjunto evidencia que o número de 10^5 simulações adotado garante a robustez estatística necessária, superando a amostragem mínima requerida para a estabilização das variáveis analisadas

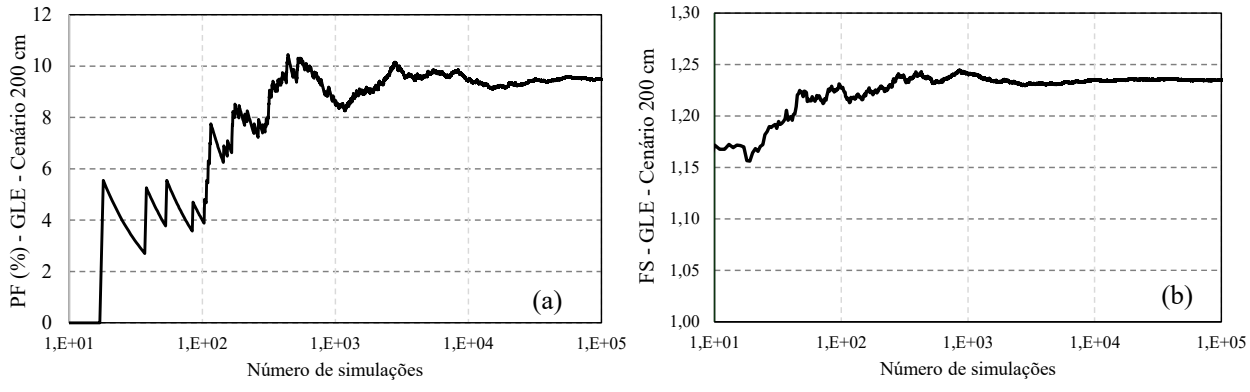


Figura 6. (a) Correlações entre o número de simulações e a PF e (b) correlação entre o número de simulações e o FS.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesse contexto, destaca-se a importância de incorporar, nas análises de estabilidade, as incertezas hidrológicas associadas a eventos extremos de precipitação. A encosta pode se apresentar estável sob determinada condição de nível d'água, contudo, com sua elevação e a perda da sucção, pode passar a apresentar

probabilidades de falha significativamente mais elevadas. Assim, torna-se fundamental considerar tais variações ainda na fase de projeto, de modo a garantir avaliações mais realistas e compatíveis com a variabilidade climática e com o comportamento geotécnico do maciço. Nesse trabalho, foi usada a hipótese simplificadora do aumento do nível d'água para simular o aumento da saturação. Entretanto, para trabalhos futuros, recomendam-se análises de fluxo transiente, com curva de retenção e modelo de sucção.

Verificou-se que, embora os métodos de cálculo tenham apresentado resultados semelhantes para rupturas circulares, as diferenças se tornaram mais expressivas nas análises com superfícies não circulares. Essas geometrias são mais representativas do mecanismo de falha esperado, que ocorre na interface entre o colúvio e o substrato rochoso. O método de Bishop Simplificado, por assumir consideráveis simplificações e por não ser indicado para superfícies não circulares, resultou em valores de Fator de Segurança mais conservadores em comparação com os métodos de Spencer e GLE para o cenário analisado em específico.

Observou-se, ainda, que a elevação do nível d'água implica redução significativa dos fatores de segurança e aumento consistente das probabilidades de falha, evidenciando a elevada sensibilidade da encosta às variações do regime hidrológico. Esse resultado reforça a necessidade de avaliar diferentes cenários de nível freático no processo de análise, especialmente em contextos sujeitos à intensificação de eventos extremos, incorporando o conceito de resiliência climática às análises de estabilidade.

As incertezas associadas aos parâmetros geotécnicos e hidrológicos mostraram-se intrinsecamente vinculadas à avaliação da segurança da encosta. Foram observados cenários com fatores de segurança inferiores à unidade associados a probabilidades de falha elevadas, refletindo a variabilidade e as incertezas associadas aos parâmetros geotécnicos, uma vez que a abordagem probabilística considera a variabilidade dos parâmetros por meio de distribuições estatísticas. De modo complementar, mesmo em situações nas quais os fatores de segurança determinísticos são superiores à unidade, podem ser observadas probabilidades de falha não nulas, evidenciando a existência de risco de ruptura.

Dessa forma, conclui-se que a consideração conjunta de múltiplos cenários hidrológicos, diferentes métodos de cálculo e análises probabilísticas constitui estratégia fundamental para avaliações mais consistentes e representativas da condição real do maciço, contribuindo para decisões de projeto mais robustas frente às incertezas inerentes ao comportamento geotécnico e às variações climáticas. Nesse sentido, a integração dessas abordagens representa uma importante metodologia na busca por infraestruturas mais resilientes em regiões expostas a eventos pluviométricos extremos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo incentivo à pesquisa e à Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) por todo o apoio.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (2025). *As enchentes no Rio Grande do Sul: lições, desafios e caminhos para um futuro resiliente.* Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Brasília: ANA.

Assis, A. P. (2020) *Risk management for geotechnical structures: consolidating theory into practice.* Soils and Rocks 43 (3), p. 311-336.

D'Orsi, R. (2011) *Correlação entre pluviometria e escorregamentos no trecho da Serra dos Órgãos da rodovia federal BR-116 RJ (Rio – Teresópolis).* Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE, Rio de Janeiro – RJ.

Eisenberger, C. N. (2003) *Estudo de um comportamento de um talude coluvionar urbano em Santa Cruz do Sul – RS.* Dissertação (Mestrado em engenharia) – Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Falcão, P. R., Fagundes, D. de F., Alves, A. M. de Lima. (2020) *Análise probabilística de aterros sobre solos moles.* Vetor, Rio Grande, 30 (1), p. 38-48.

Forzieri, G., Bianchi, A., Batista e Silva, F., Marin Herrera, M. A., Leblois, A., Lavalle, C., Aerts, J. C. J. H., Feyen, L. (2018) *Escalating impacts of climate extremes on critical infrastructures in Europe.* Global Environmental Change, v. 48, p. 97–107.

Gerscovich, D. M. S. (2012) *Estabilidade de Taludes*. São Paulo: Oficina de Textos.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2019) *Suscetibilidade a deslizamentos do Brasil: primeira aproximação*. IBGE, Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. Rio de Janeiro.

Lacerda, W. A., Sandroni, S. S. (1985) *Movimentos de Massas Coluviais.* Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Rio de Janeiro.

Lambe, T. W., Whitman, R. V. (1979) *Soil Mechanics*. New York: John Wiley & Sons Inc.

Nascimento, L. A., Gomes, L.T., Becher, D. H., Modler, A. L., Baroni, M. (2025) *Estudo Numérico da Estabilidade de Encostas sob Projeções Futuras de Chuvas Extremas em Taludes Representativos do Sul do Brasil.* IX Conferência Brasileira Sobre Estabilidade de Encostas, Bento Gonçalves.

Pinheiro, R. J. B., Soares, J. M. D., Bica, A. V. D., Bressani, L. A., Eisenberger, C. N. (2002) *Investigação Geotécnica de uma Encosta na Área Urbana de Santa Cruz do Sul – RS*, XII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, São Paulo.

U.S. Army Corps of Engineers. (1997) Introduction to probability and reliability methods for use in geotechnical engineering. Department of the Army, Washington, United States.

World Meteorological Organization. (2025) *State of the Global Climate 2024.* Geneva: WMO, 2025. Disponível em: < https://wmo.int/publication-series/state-of-global-climate/state-of-global-climate-2024>. Acessado em 19 jun. 2026.