



ISSN: 2447-3359

REVISTA DE GEOCIÊNCIAS DO NORDESTE

Northeast Geosciences Journal

v. 11, nº 1 (2025)

<https://doi.org/10.21680/2447-3359.2025v11n1ID35122>



Análise de estabilidade de taludes usando uma abordagem probabilística

Slope stability analysis using a probabilistic approach

Matheus Veras Neves¹; Thâmara Ingrid Costa Garcês²; George Fernandes Azevedo³; Felipe Alexander Vargas Bazán⁴; Paulo César de Oliveira Queiroz⁵; Ronnan Wembles Martins Barreira⁶; Luanne de Fátima Pereira Batalha⁷

- ¹ Universidade Federal do Maranhão, Departamento de Engenharia Civil, São Luís/MA, Brasil. Email: matheus.vneves@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4246-2089>
- ² Universidade Federal do Maranhão, Departamento de Engenharia Civil, São Luís/MA, Brasil. Email: thamaragarcês@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-8404-8456>
- ³ Universidade Federal do Maranhão, Departamento de Engenharia Civil, São Luís/MA, Brasil. Email: gf.azevedo@ufma.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2207-7282>
- ⁴ Universidade Federal do Maranhão, Departamento de Engenharia Civil, São Luís/MA, Brasil. Email: felipe.vargas@ufma.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6799-0799>
- ⁵ Universidade Federal do Maranhão, Departamento de Engenharia Civil, São Luís/MA, Brasil. Email: pco.queiroz@ufma.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8905-1757>
- ⁶ Universidade Federal do Maranhão, Departamento de Engenharia Civil, São Luís/MA, Brasil. Email: ronnan-wmb@hotmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1176-5191>
- ⁷ Universidade Federal do Maranhão, Departamento de Engenharia Civil, São Luís/MA, Brasil. Email: luannebatalha@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-7955-891X>

Resumo: Este artigo apresenta um estudo que utiliza implementações computacionais dos métodos FOSM e Monte Carlo. Estes métodos visam determinar a probabilidade de ruptura de encostas em áreas suscetíveis a deslizamentos rasos. O estudo concentra-se na região da Vila Rabelo, situada na zona administrativa de Sobradinho II, Distrito Federal. A abordagem computacional emprega duas ferramentas de programação distintas: o MATLAB para o método FOSM, e o FORTRAN para o método de simulação de Monte Carlo. A análise revela que o método Monte Carlo tende a produzir valores de probabilidade de ruptura mais elevados em comparação com o método FOSM, especialmente em terrenos íngremes. Foi realizada uma análise de convergência para o método de Monte Carlo, a fim de ilustrar como é determinado o número de simulações adequado. Além disso, os resultados indicam proximidade espacial e ocasionalmente valores mais altos na distribuição espacial de probabilidades de ruptura obtidas a partir do método Monte Carlo em comparação com o método FOSM. As variações nos valores de probabilidade de ruptura alcançados por meio de métodos probabilísticos decorrem das configurações de distribuição da variável coesão, que é um dos dados de entrada.

Palavras-chave: Movimentos de massa; Abordagem probabilística; Estabilidade de taludes.

Abstract: This paper presents a study that utilizes computational implementations of the FOSM and Monte Carlo methods. These methods aim to determine the probability of slope rupture in areas prone to shallow landslides. The study focuses on the Vila Rabelo region situated in the administrative zone of Sobradinho II, Federal District. The computational approach involves two distinct programming tools: MATLAB for the FOSM method, and FORTRAN for the Monte Carlo simulation method. The analysis reveals that the Monte Carlo method tends to yield higher maximum rupture probability values compared to the FOSM method, particularly in steep terrain. A convergence analysis for the Monte Carlo method was undertaken to illustrate how the appropriate number of simulations is determined. Furthermore, findings indicate spatial proximity and occasionally higher values in the spatial distribution of rupture probabilities obtained from the Monte Carlo method compared to the FOSM method. The variations in rupture probability values achieved through probabilistic methods stem from the distribution configurations of the cohesion variable, which is one of the input data.

Keywords: Landslides; Probabilistic approach; Slope stability.

Recebido: 17/01/2024; Aceito: 06/09/2024; Publicado: 28/01/2025.

1. Introdução

Os movimentos de massa, juntamente com as inundações, são desastres com elevada taxa de incidência em todo o mundo. Resultam em impactos sociais e econômicos nas sociedades, particularmente em áreas urbanas densamente povoadas e relevos acidentados. As estimativas indicam que o número de movimentos de massa registrados globalmente supera o de outros desastres naturais, incluindo terremotos, furacões e vulcões (CHEN; LEE, 2004).

No Brasil, as pesquisas sobre movimentos de massa foram impulsionadas pelo trabalho de Guidicini e Nieble (1984), que ofereceu uma classificação sistemática desses eventos, suas causas e agentes, juntamente com métodos para calcular a estabilidade de taludes. Segundo Furlan, Lacruz e Susen (2011), os desastres associados a movimentos de massa no Brasil resultam de uma combinação de eventos adversos e vulnerabilidades físicas e socioeconômicas. Isto destaca a necessidade de identificar espacialmente áreas suscetíveis à ocorrência de eventos que podem definir ameaças e verificar atributos que aumentam o risco.

Devido aos diversos fatores envolvidos nos processos de movimentos de massa e às inúmeras informações que precisam ser consideradas nas análises de risco e suscetibilidade, os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) têm sido amplamente utilizados em conjunto com modelos físicos em pesquisas (VENANCIO *et al.*, 2013). O modelo unidimensional de taludes infinitos é uma das abordagens mais utilizadas para análise de estabilidade de taludes (CHO; LEE, 2002; COLLINS; ZNIDARCIC, 1998; FRATTINI *et al.*, 2004). O modelo SHALSTAB, proposto e validado por Montgomery e Dietrich (1994), é outra técnica altamente reconhecida. Este modelo avalia a saturação do solo em função da infiltração das chuvas através de um índice topográfico, destacando que a topografia superficial serve como um indicador primário para prever ocorrências de deslizamentos rasos. Como resultado, este modelo tem um valor significativo ao identificar de forma eficaz áreas altamente suscetíveis a deslizamentos de terra sob a influência das chuvas.

A utilização de técnicas probabilísticas, como o método FOSM (First Order Second Moment), Estimativas Pontuais e métodos de Monte Carlo, em análises de confiabilidade, permite um tratamento mais rigoroso das incertezas nos processos de projeto geotécnico. Embora a aplicação de métodos de confiabilidade não garanta a prevenção de falhas, sua implementação sistemática e rigorosa capacita os engenheiros a discernir quais fatores incontrolláveis impactarão significativamente tais falhas (MONTROYA; ASSIS, 2011).

Por exemplo, Azevedo, Carvajal e Souza (2018) estudaram uma região do Distrito Federal, realizando uma análise de suscetibilidade a ocorrências de deslizamentos. A utilização de uma abordagem probabilística permitiu a incorporação da variabilidade dos parâmetros no modelo de avaliação da estabilidade de taludes, produzindo resultados de ameaça em termos de probabilidades de falha. Martini *et al.* (2006) empregaram SIG e técnicas de decisão multicritério para avaliar a suscetibilidade a processos erosivos e movimentos de massa em Santa Catarina, especificamente no entorno da usina Quebra-Queixo. O estudo rendeu um mapa temático, integrando parâmetros como relevo do terreno, composição do solo e cobertura da terra, estabelecendo assim a distribuição espacial das classes de suscetibilidade aos processos mencionados nas proximidades do reservatório da barragem.

Este artigo compreende a implementação computacional de métodos capazes de determinar a probabilidade de ruptura de taludes em áreas suscetíveis a deslizamentos rasos, usando especificamente o método FOSM e o método de simulação de Monte Carlo. Além de facilitar diversas aplicações em estudos geotécnicos relativos à estabilidade de taludes, como a avaliação da confiabilidade e da incerteza ligada à mecânica das rochas e aos desastres naturais, esses métodos também permitem a derivação de índices para avaliação de suscetibilidade.

2. Definição e Contextualização da área de Estudo

A região da Vila Rabelo, área de estudo avaliada nesta pesquisa, está situada na região administrativa de Sobradinho II, Distrito Federal, Brasil. Segundo dados da Pesquisa Distrital por Amostra de Domicílios – PDAD 2018 (CODEPLAN, 2019), a população urbana de Sobradinho II era de 85.574 habitantes, e sua área era de aproximadamente 285 km². A região experimentou um rápido crescimento populacional na década de 1990 devido ao Programa de Assentamento de População de Baixa Renda.

Essa área abriga famílias em situação de vulnerabilidade e está situada em terrenos irregulares em meio a 23 condomínios. Um levantamento realizado em 2012 pela Defesa Civil do Distrito Federal utilizou o mapeamento para identificar múltiplas zonas de risco na região da Vila Rabelo, reconhecendo 421 residências suscetíveis a alguma condição de instabilidade.

A Vila Rabelo tem um histórico de questões na sua ordenação territorial. Deslizamentos recorrentes ocorrem devido à localização das residências da população na região. O estudo da Defesa Civil identificou 209 locais com risco de

deslizamentos tanto na Vila Rabelo I quanto na Vila Rabelo II. A Figura 1 fornece uma representação precisa da área delimitada para esta pesquisa.

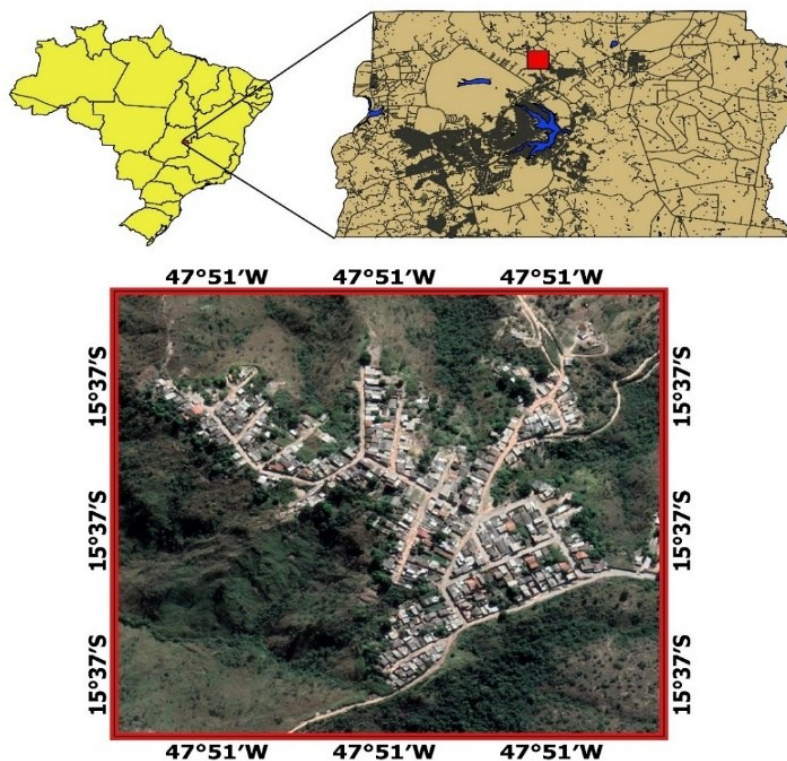


Figura 1 – Área de estudo.
Fonte: Autores (2024).

3. Metodologia

A metodologia proposta para esta pesquisa envolveu a implementação computacional de métodos capazes de determinar a probabilidade de ruptura em áreas propensas a deslizamentos rasos, aliado a um modelo de estabilidade. Especificamente, os métodos empregados foram o método do segundo momento de primeira ordem (FOSM) e o método de simulação de Monte Carlo.

A implementação computacional utilizou duas ferramentas de programação distintas: MATLAB (*Matrix Laboratory*) e FORTRAN (*Formula Translator*). A linguagem FORTRAN foi escolhida para o método de Monte Carlo devido à sua complexidade e alta demanda computacional, necessitando de uma linguagem de desempenho de nível médio para processamento eficiente de dados e manipulação de um número substancial de simulações. Para o método FOSM, por ser um método mais simples, a ferramenta MATLAB foi selecionada por representar um software de uso mais facilitado e alinhado à simplicidade do método.

A plataforma computacional Spring 5.4.3 (CÂMARA *et al.*, 1996), representando um Sistema de Informação Geográfica, foi utilizada para gerenciar as informações espaciais da região abrangida. Isso envolveu o estabelecimento de um banco de dados e um projeto dedicados à pesquisa. O software QGIS foi empregado para produzir as apresentações finais dos mapas.

Os dados de entrada espaciais compreendem mapas topográficos e de solo. O mapa topográfico foi obtido da Companhia TERRACAP, com formato matricial e resolução espacial de 5 m. Esta camada serviu de base para a criação da matriz de declividades do terreno (Figura 2).

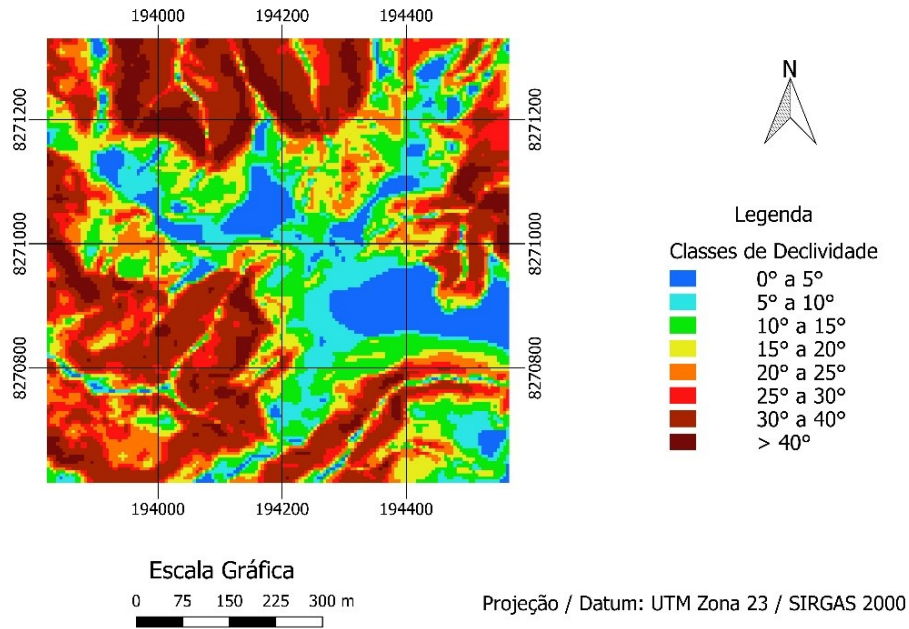


Figura 2 – Mapa de declividades do terreno.
 Fonte: Autores (2024).

A área de estudo foi discretizada em pixels, correspondendo à mesma resolução espacial do mapa topográfico, resultando em uma matriz composta por 152 colunas e 147 linhas.

O mapa de solos utilizado é uma versão atualizada do mapa pedológico digital do Distrito Federal, proposto por Reatto *et al.* (2004). Toda a área de estudo está dentro do domínio do Cambissolo.

Vários métodos estão disponíveis para avaliar a estabilidade de taludes. Em situações onde o plano de ruptura potencial é quase paralelo à superfície do terreno, o método de talude infinito pode ser aplicado (CORDOBA; MERGILI; ARISTIZÁBAL, 2020). Nestes casos, a expressão para o fator de segurança é dada pela Equação 1:

$$FS = \frac{c' + \gamma \cdot h \cdot \cos^2 \theta \cdot \tan \phi'}{\gamma \cdot h \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta} \quad (1)$$

Onde c' é a coesão efetiva do solo, γ é o peso específico do solo, h é a espessura da camada do solo, θ é a inclinação (declividade) do solo e ϕ' é o ângulo de atrito efetivo do solo.

Os valores médios dos parâmetros do modelo relativos à classe pedológica Cambissolo são derivados do estudo de Azevedo, Carvajal e Souza (2018) e extraídos da literatura científica sobre caracterização geotécnica de solos do Distrito Federal. Os parâmetros médios do modelo são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros de resistência e peso específico do solo.

Solo	Parâmetros do solo		
	c'	ϕ'	γ
	kPa	°	kN/m ³
Cambissolo háplico	5	25	15

Fonte: Autores (2024).

Um modelo empírico preditivo proposto por Catani, Segoni e Falorni (2010) foi empregado para representar a variabilidade espacial da espessura do solo na área de estudo. Este modelo é descrito pela Equação 2:

$$h_i = h_{max} \cdot \left[1 - \frac{\tan\theta_i - \tan\theta_{min}}{\tan\theta_{max} - \tan\theta_{min}} \cdot \left(1 - \frac{h_{min}}{h_{max}} \right) \right] \quad (2)$$

A equação acima estabelece uma correlação entre a espessura do solo em um determinado pixel e o correspondente ângulo de inclinação representativo da célula. Nesta equação, h_i representa a espessura do solo no pixel i ; h_{max} e h_{min} denotam os valores máximos e mínimos medidos de espessura do solo dentro da área, respectivamente. O valor de θ_i indica a inclinação local em um pixel i , enquanto θ_{max} e θ_{min} indicam os valores máximo e mínimo de inclinação (ou declividade) observados no local de teste. Para as análises foi adotado o cenário com $h_{min} = 0,7$ m e $h_{max} = 2$ m. A utilização deste modelo justifica-se por se ter um único tipo de solo da área de estudo. Assim, torna-se viável incorporar a variabilidade da espessura do solo com base no critério de relevo.

É fundamental observar que a inclinação do terreno impacta diretamente o acúmulo de água. Em encostas mais íngremes, há uma tendência para solos mais rasos com infiltração e percolação de água limitadas. A chuva tende a retirar as partículas de solo. Por outro lado, áreas mais planas são propensas ao acúmulo de água, caracterizadas por maior percolação e escoamento superficial mais lento.

3.1 Métodos probabilísticos

Na análise probabilística, foram levadas em consideração duas variáveis aleatórias: coesão e ângulo de atrito. Os demais parâmetros da Equação 1 foram tratados como determinísticos: peso específico, espessura do solo e declividade. Segundo Tonus (2009), a coesão foi modelada por uma distribuição de probabilidade lognormal com coeficiente de variação de 40%. Enquanto isso, o ângulo de atrito foi modelado usando uma distribuição de probabilidade normal com coeficiente de variação de 10%.

Na abordagem probabilística é necessário estabelecer uma função de desempenho, também conhecida como função de estado limite. Esta função depende de variáveis aleatórias pertinentes ao problema. Neste caso, a função de desempenho é derivada do fator de segurança do método de talude infinito:

$$g = g(c', \varphi') = FS(c', \varphi') - 1 \quad (3)$$

Nesta equação, a interdependência das variáveis aleatórias é claramente destacada. Valores negativos da função de desempenho correspondem à ruptura, enquanto valores positivos indicam segurança. Portanto, a probabilidade de ruptura, denotada como P_r , é calculada determinando a probabilidade de que a função de desempenho produza valores negativos, ou matematicamente, $P_r = P\{g \leq 0\}$.

3.2 Método FOSM

No método FOSM, a metodologia de cálculo envolve o emprego dos termos de primeira ordem de uma expansão em série de Taylor da função de desempenho centrada no valor médio de cada variável aleatória.

No problema em questão, em que as variáveis aleatórias abrangem a coesão e o ângulo de atrito, a Equação 4 oferece uma aproximação de primeira ordem para o valor médio, ou valor esperado, do fator de segurança:

$$E[FS] = FS(\mu_{c'}, \mu_{\varphi'}) \quad (4)$$

Aqui, $\mu_{c'}$ e $\mu_{\varphi'}$ denotam os valores médios de coesão e ângulo de atrito, respectivamente. Assim, o segundo termo da Equação 4 representa a avaliação do fator de segurança utilizando os valores médios das variáveis aleatórias.

Por outro lado, assumindo independência estatística entre as variáveis aleatórias do problema, a Equação 5 oferece uma aproximação de primeira ordem para a variância do fator de segurança.

$$Var(FS) = Var(c') \cdot \left(\frac{\partial FS}{\partial c'} \right)^2 + Var(\varphi') \cdot \left(\frac{\partial FS}{\partial \varphi'} \right)^2 \quad (5)$$

Nesta equação, $Var(c')$ e $Var(\varphi')$ representam as variâncias de coesão e ângulo de atrito, respectivamente. Além disso, $\partial FS/\partial c'$ e $\partial FS/\partial \varphi'$ denotam as derivadas parciais do fator de segurança em relação à coesão e ao ângulo de atrito, respectivamente. Essas derivadas são avaliadas nos valores médios das respectivas variáveis aleatórias. Neste estudo, as derivadas parciais foram determinadas analiticamente.

No âmbito do método FOSM, dada a função de desempenho delineada na Equação 6, o índice de confiabilidade, conforme descrito por Cornell (1969), é derivado da seguinte forma:

$$\beta = \frac{E[FS]-1}{\sqrt{Var(FS)}} \quad (6)$$

Utilizando o índice de confiabilidade definido na Equação 6, torna-se viável deduzir a subsequente aproximação de primeira ordem para a probabilidade de falha:

$$P_r = \varphi(-\beta) \quad (7)$$

Onde $\varphi(\cdot)$ representa a função de distribuição cumulativa da distribuição normal padrão.

Para a implementação computacional do método FOSM, foi desenvolvido um código utilizando o software MATLAB. Este código processou os dados de entrada abrangendo a declividade do talude, espessura do solo e peso específico do solo, juntamente com os valores médios de coesão e ângulo de atrito.

Utilizando as Equações 4 a 7, o índice de confiabilidade e a probabilidade de falha foram calculados para cada pixel. Consequentemente, este processo produziu uma matriz numérica contendo os valores de probabilidade de ruptura para toda a área de estudo.

3.2 Método de Simulação de Monte Carlo

A simulação de Monte Carlo envolve a utilização de números aleatórios. Este método consiste na simulação numérica de uma extensa gama de cenários, as quais representam idealmente todas as combinações possíveis das variáveis aleatórias do problema. Tais simulações numéricas são executadas, fundamentando-se nas distribuições de probabilidade das referidas variáveis.

No contexto do problema examinado, cada simulação envolve a geração de amostras de coesão e ângulo de atrito (que são as variáveis aleatórias independentes). Posteriormente, o valor da função de desempenho é calculado através da Equação 8 para verificar se o cenário simulado corresponde a uma condição de falha ($g \leq 0$, ou $FS \leq 1$) ou não ($g > 0$, ou $FS > 1$). Este processo iterativo é repetido inúmeras vezes. Consequentemente, uma estimativa direta da probabilidade de ruptura pode ser obtida da seguinte forma:

$$P_r = \frac{N_r}{N} \quad (8)$$

Nesta equação, N_r significa a contagem de simulações onde ocorreu a falha (ou seja, as simulações com $g \leq 0$), e N representa o número total de simulações. Segundo Wyllie e Mah (2004), é imperativo que N seja maior que 100.

O método de simulação de Monte Carlo baseia-se fundamentalmente na geração de números aleatórios, com distribuição uniforme no intervalo de 0 e 1. No contexto deste estudo, este processo foi executado através do que é conhecido como gerador congruencial linear. O comportamento deste algoritmo é governado por uma coleção de constantes que conferem suas características distintas. Nesse sentido, os valores sugeridos por Beck (2019) foram empregados neste trabalho. Além disso, este gerador exige que o usuário forneça um valor inicial de "semente", um número inteiro empregado para iniciar o processo de simulação.

Amostras das variáveis aleatórias pertencentes ao problema foram geradas a partir de números aleatórios uniformemente distribuídos, seguindo método descrito na literatura (BECK, 2019; NOWAK; COLLINS, 2013). Esta abordagem baseia-se nas distribuições de probabilidade estabelecidas das variáveis aleatórias.

Para realizar a implementação computacional do método Monte Carlo, foi desenvolvido um código utilizando a linguagem Fortran. Dentro deste código, as entradas abrangem a declividade do talude, a espessura do solo, o peso específico do solo e os valores médios de coesão e ângulo de atrito. Além disso, o código necessita de valores de entrada para o número de simulações de Monte Carlo e a "semente" do gerador de números aleatórios.

O procedimento executado calcula a probabilidade de ruptura de cada célula utilizando a Equação 8, culminando na geração de uma matriz contendo os valores numéricos representando as probabilidades de falha em toda a área de estudo.

Assim, dentro da área de estudo, o método de Monte Carlo foi empregado utilizando números variados de simulação: 1×10^4 (dez mil), 5×10^4 (cinquenta mil), 1×10^5 (cem mil), 1×10^6 (um milhão) e 1×10^7 (dez milhões). Este processo produziu matrizes que abrangem a probabilidade de falha para cada caso. Posteriormente, foi realizada uma avaliação da variação da probabilidade de ruptura em relação ao número de simulações em pixels específicos, coincidindo com os pontos da grade que possuem as maiores e menores declividades. Através desta análise, tornou-se viável verificar como a probabilidade de ruptura se comporta nos diferentes números de simulação pelo método de Monte Carlo.

4. Resultados e discussão

Utilizando as matrizes de resultados produzidas pelas implementações computacionais dos métodos FOSM e Monte Carlo, tornou-se viável derivar mapas de probabilidade de falha para a área de estudo. Para conseguir isso, foi empregado o procedimento de fatiamento de classes dentro do software Spring. A operação de fatiamento consistiu em gerar uma imagem temática tomando-se como base a grade retangular de probabilidade de ruptura. O fatiamento considerou as matrizes numéricas obtidas das análises como dados de entrada, associando o valor de cada célula da área de estudo a um intervalo de valores de probabilidade de falha, o qual seria a classe temática correspondente. Inicialmente, categorias temáticas relacionadas às probabilidades de ruptura foram criadas separadamente para receber os resultados dos métodos FOSM e de Monte Carlo. A partir disso, a definição dos intervalos das fatias foi realizada em função da variação dos valores da grade resultante em cada simulação. Esses mapas resultantes estão representados visualmente nas Figuras 3 a 8.

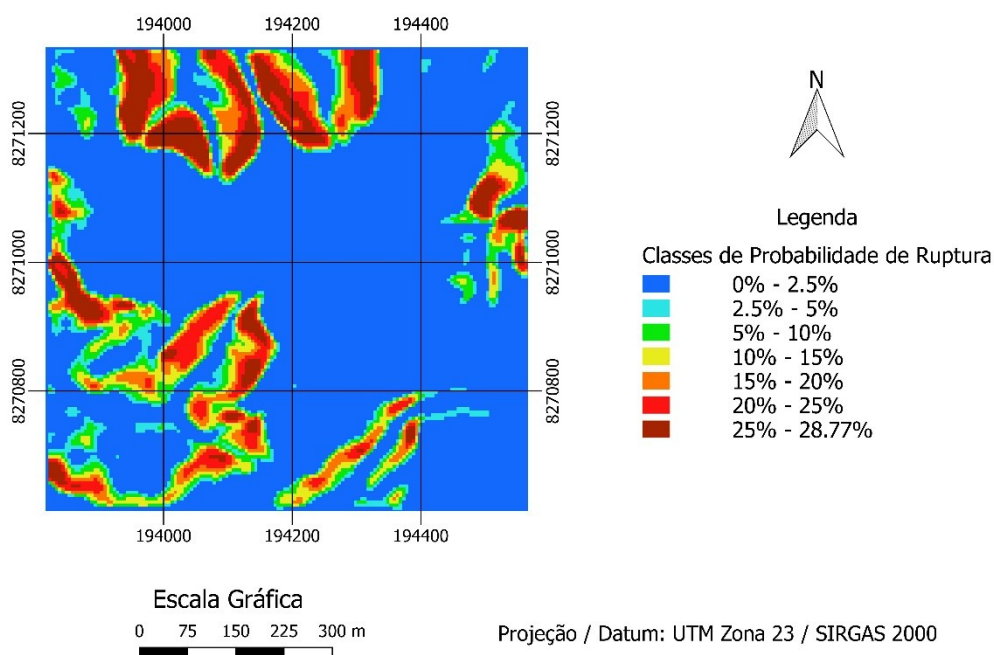


Figura 3 – Mapa de probabilidade de ruptura pelo método FOSM.
Fonte: Autores (2024).

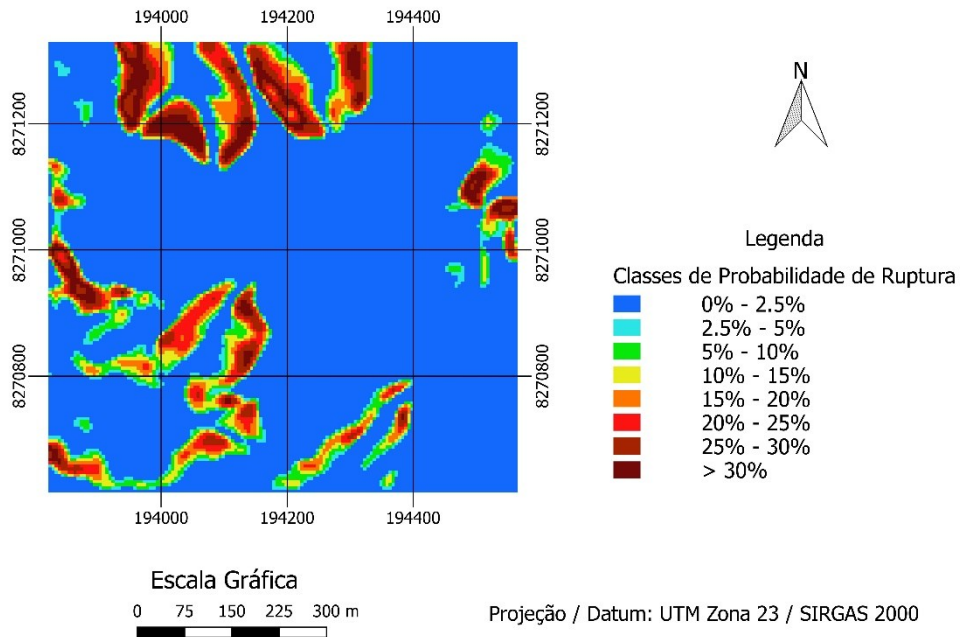


Figura 4 – Mapa de probabilidade de ruptura pelo método de Monte Carlo (1×10^4 simulações).
Fonte: Autores (2024).

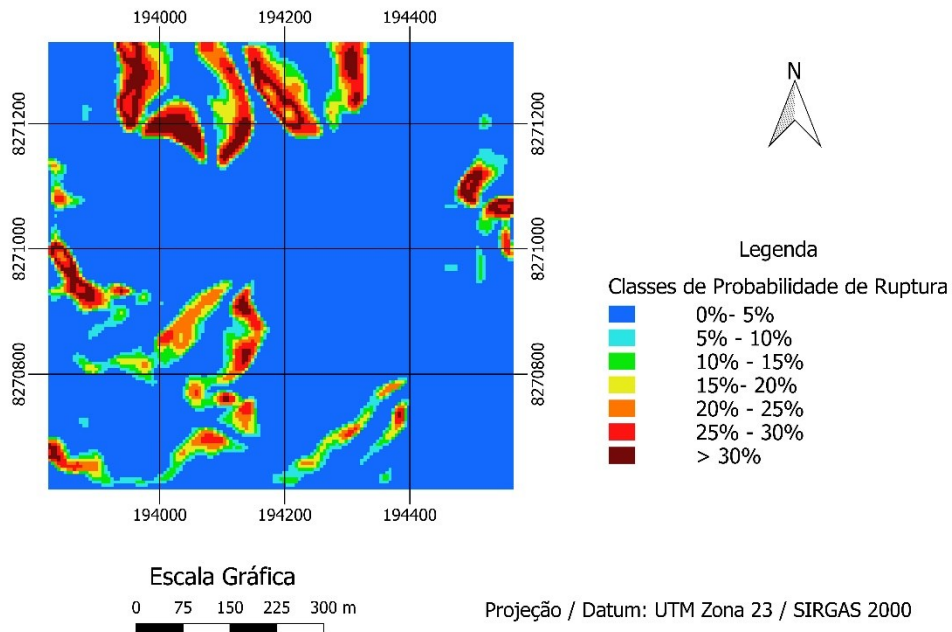


Figura 5 – Mapa de probabilidade de ruptura pelo método de Monte Carlo (5×10^4 simulações).
Fonte: Autores (2024).

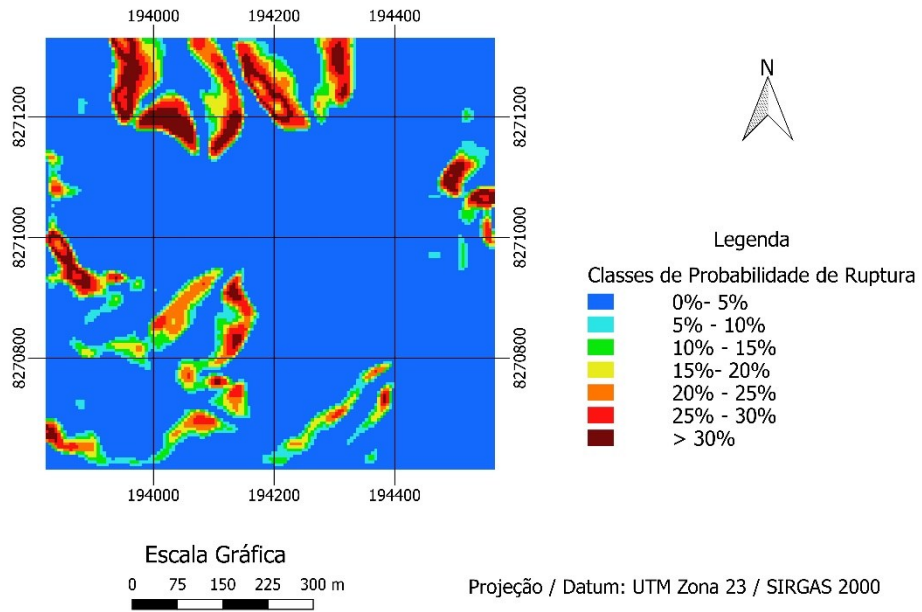


Figura 6 – Mapa de probabilidade de ruptura pelo método de Monte Carlo (1×10^5 simulações).
Fonte: Autores (2024).

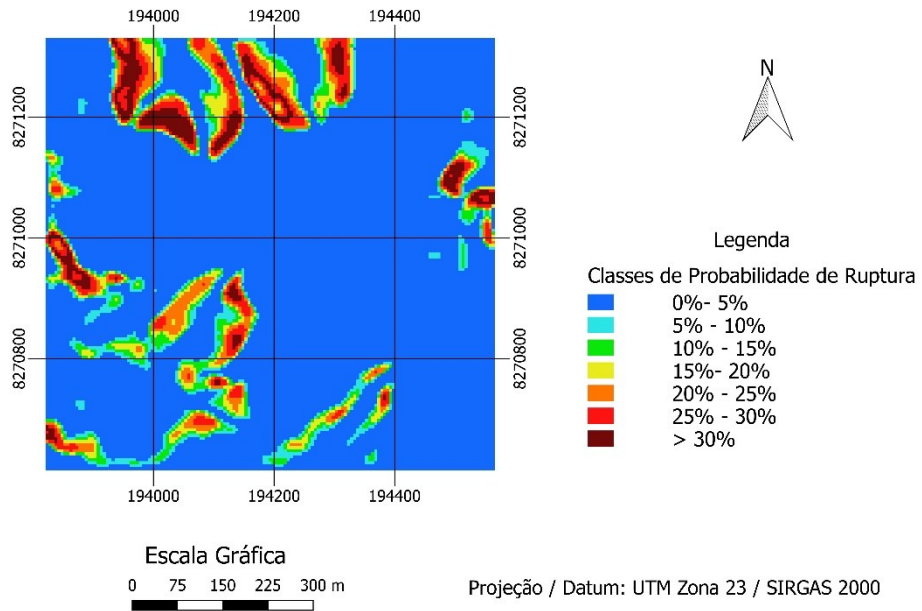


Figura 7 – Mapa de probabilidade de ruptura pelo método de Monte Carlo (1×10^6 simulações).
Fonte: Autores (2024).

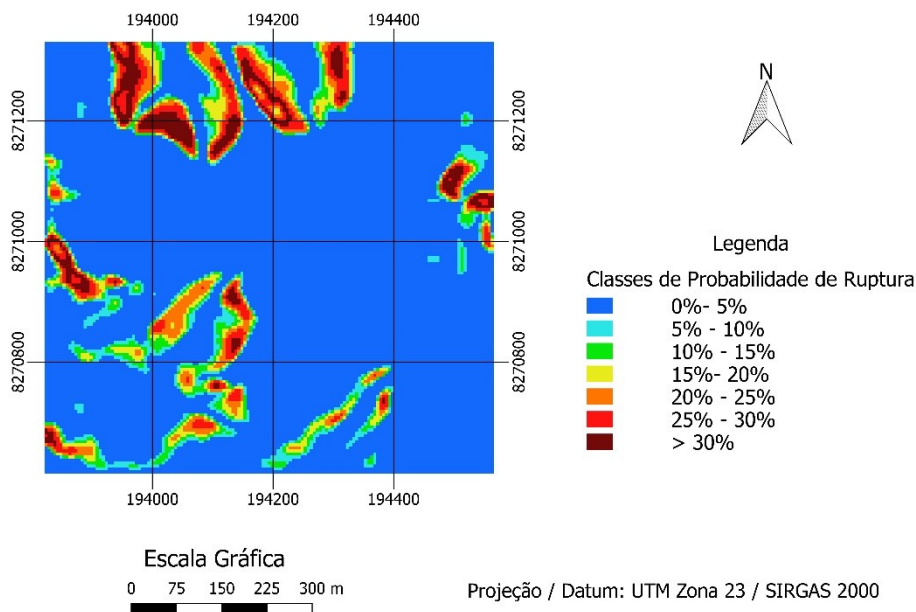


Figura 8 – Mapa de probabilidade de ruptura pelo método de Monte Carlo (1×10^7 simulações).
 Fonte: Autores (2024).

Além disso, foram calculados os valores máximos de probabilidade de falha para cada cenário, conforme ilustrado na Tabela 2.

Tabela 2 – Valores máximos de probabilidade de ruptura em cada caso.

Quantidade de simulações	Método probabilístico	
	Monte Carlo	FOSM
10.000	0.3252	0.287741
50.000	0.32653	
100.000	0.32544	
1.000.000	0.32599	
10.000.000	0.32578	

Fonte: Autores (2024).

Tendo em conta a disposição geral da área avaliada, surgiu uma observação: o método de Monte Carlo geralmente produz valores de probabilidade máxima de falha mais elevados em comparação com aqueles deduzidos pelo método FOSM.

Portanto, foi realizada uma avaliação para estabelecer a diferença entre a probabilidade dos resultados de probabilidade de ruptura adquiridos pelo método Monte Carlo empregando simulações 1×10^7 e aqueles obtidos pelo método FOSM. Esta avaliação levou à produção do mapa representado na Figura 9.

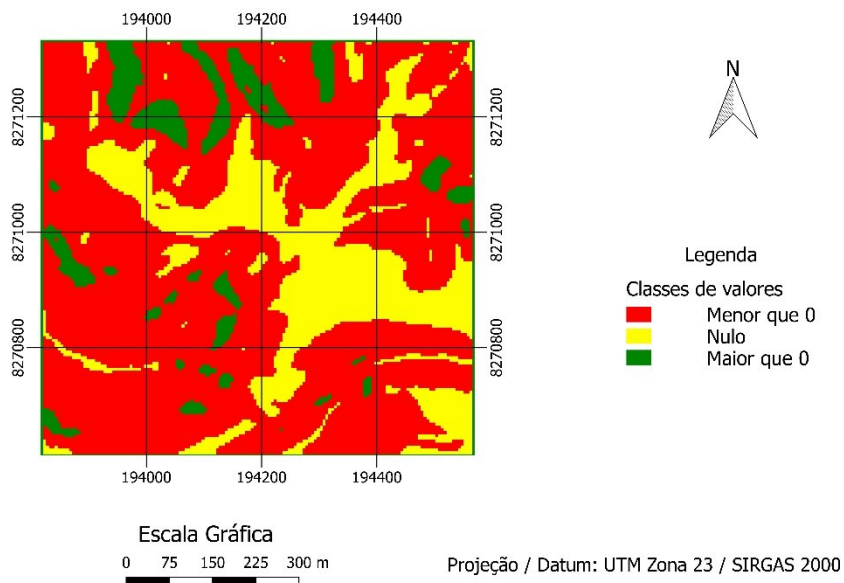


Figura 9 – Valores correspondentes à diferença entre as probabilidades de ruptura obtidas pelo método de Monte Carlo (1×10^7 simulações) e o método FOSM.
 Fonte: Autores (2024).

Uma observação revela uma tendência nos resultados: valores positivos manifestam-se em áreas com declives mais acentuados, aproximando-se dos valores máximos. Isto indica que, nessas circunstâncias, o método de Monte Carlo apresenta valores mais elevados. Por outro lado, os valores nulos tendem a manifestar-se em regiões mais planas, significando uma convergência de ambos os métodos para resultados idênticos em tais condições. Este fenômeno é representado visualmente pela distribuição de pixels dentro da grade, conforme exemplificado na Tabela 3.

Tabela 3 – Tabulação Cruzada entre as matrizes de declividade e da diferença entre FOSM e Monte Carlo, por número de pixels classificados.

Declividade	Diferença entre o método de Monte Carlo (10^7 simulações) e FOSM		
	< 0	0	> 0
0° - 5°	3	1945	0
5° - 10°	131	2013	0
10° - 15°	2243	891	0
15° - 20°	2846	45	0
20° - 25°	2608	3	0
25° - 30°	2466	0	0
30° - 40°	4247	0	380
> 40°	242	0	1244

Fonte: Autores (2024).

Ao examinar a distribuição de pixels por meio da matriz, observa-se um padrão estabelecido. Na maioria dos casos, o método FOSM produz probabilidades de ruptura superiores às geradas pelo método Monte Carlo, com exceção de regiões elevadas, onde a diferença positiva é mais expressiva. Os valores nulos, por outro lado, limitam-se a áreas caracterizadas por declividades inferiores a 25°, com maior predominância em declividades inferiores a 10°.

Seguindo metodologia análoga às etapas anteriores, foi feita uma comparação entre as classes de declividade pelo método de Monte Carlo com simulações 1×10^7 . Esta análise produziu os dados descritos na Tabela 4, revelando uma maior

prevalência de probabilidades de ruptura abaixo de 5% em todas as classes de declividade. Por outro lado, probabilidades superiores a 5% foram observadas apenas em classes de declividade superiores a 25°.

Tabela 4 – Tabulação Cruzada entre as matrizes de declividade e a probabilidade de ruptura para o método de Monte Carlo com 10⁷ simulações, por quantidade de pixels classificados.

Declividade	Probabilidade de ruptura pelo método de Monte Carlo (10 ⁷ simulações)						
	0% - 5%	5% - 10%	10% - 15%	15% - 20%	20% - 25%	25% - 30%	> 30%
0° - 5°	1948	0	0	0	0	0	0
5° - 10°	2144	0	0	0	0	0	0
10° - 15°	3134	0	0	0	0	0	0
15° - 20°	2891	0	0	0	0	0	0
20° - 25°	2611	0	0	0	0	0	0
25° - 30°	2432	33	1	0	0	0	0
30° - 40°	1633	951	744	611	499	185	4
> 40°	15	16	38	96	203	536	582

Fonte: Autores (2024).

Analisando os valores de declive correspondentes aos pixels da malha onde as probabilidades de falha de Monte Carlo excedem as do método FOSM, foram identificados um total de 1.624 valores de declive. Esses resultados produzem um valor médio de inclinação de aproximadamente 43,5°, com os valores máximos e mínimos registrados em 55,9° e 36,5°, respectivamente.

Posteriormente, foi realizado um exame específico dos pixels que exibem os valores de inclinação máxima e mínima, examinando a alteração da probabilidade de ruptura com números variados de simulações. Dois pixels foram submetidos a análise: o primeiro situado na linha 21 e coluna 72, correspondente ao valor de declive mais acentuado, e o segundo situado na linha 12 e coluna 36, representando o valor de menor declive. Essas flutuações estão representadas nas Figuras 10 e 11.

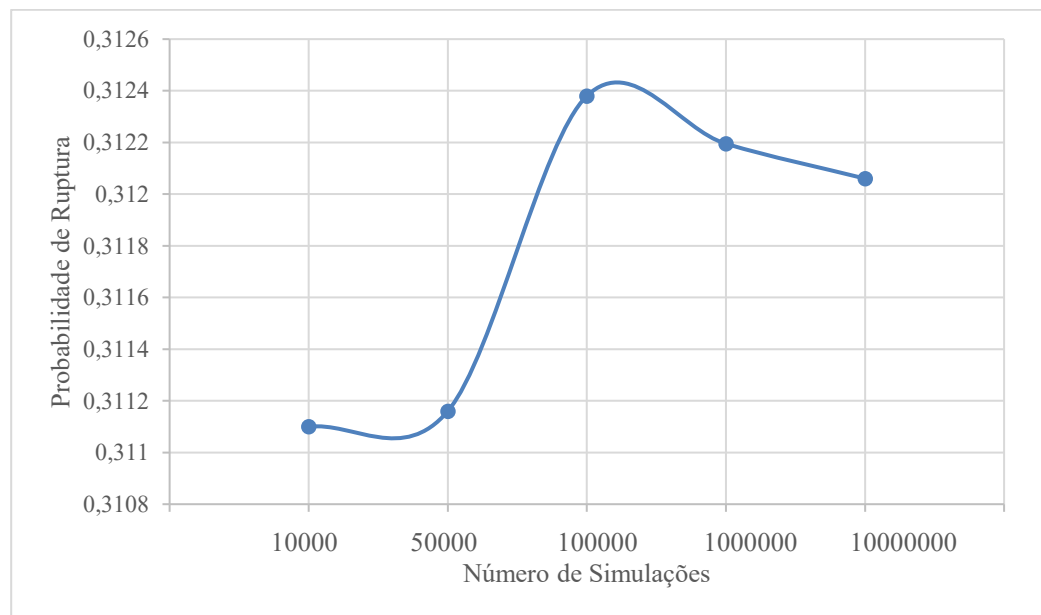


Figura 10 – Variação da probabilidade de ruptura em relação à quantidade de simulações de Monte Carlo para o pixel com a maior declividade.

Fonte: Autores (2024).

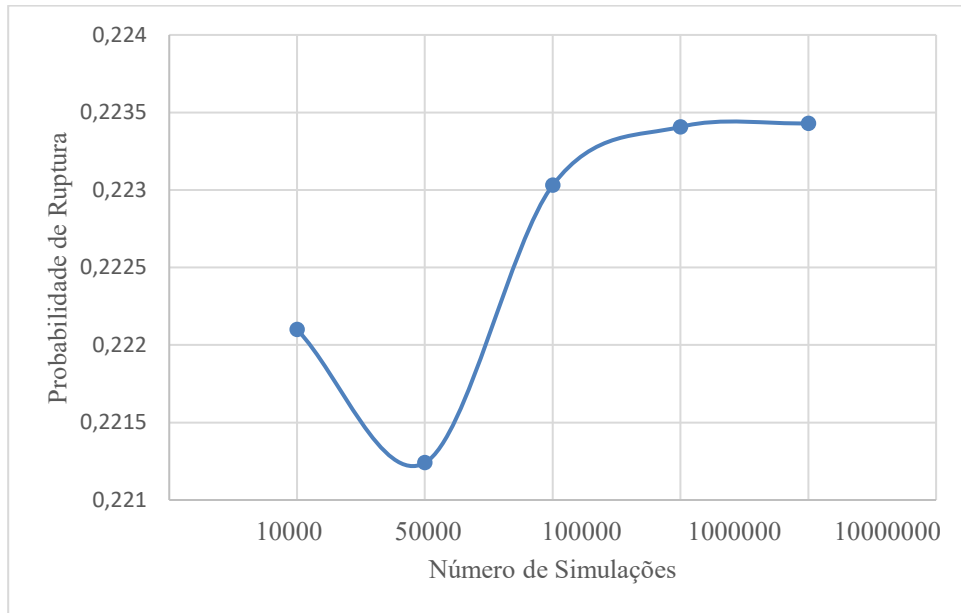


Figura 11 – Variação da probabilidade de ruptura em relação à quantidade de simulações de Monte Carlo para o pixel com a menor declividade.

Fonte: Autores (2024).

Os resultados de ambos os pixels exibem valores mais baixos de probabilidade de falha com menos simulações. Com o aumento do número de simulações, há uma tendência de aumento na probabilidade de falha seguida de estabilização. Observou-se que para taludes com menores inclinações, a probabilidade de falha aumenta à medida que aumenta o número de simulações. Por outro lado, para encostas mais íngremes, o valor máximo é alcançado em 100.000 simulações.

Além disso, foram calculados fatores de segurança determinísticos para toda a área de estudo, utilizando os valores médios de coesão e ângulo de atrito da Equação 1. A Figura 12 representa o mapa do fator de segurança.

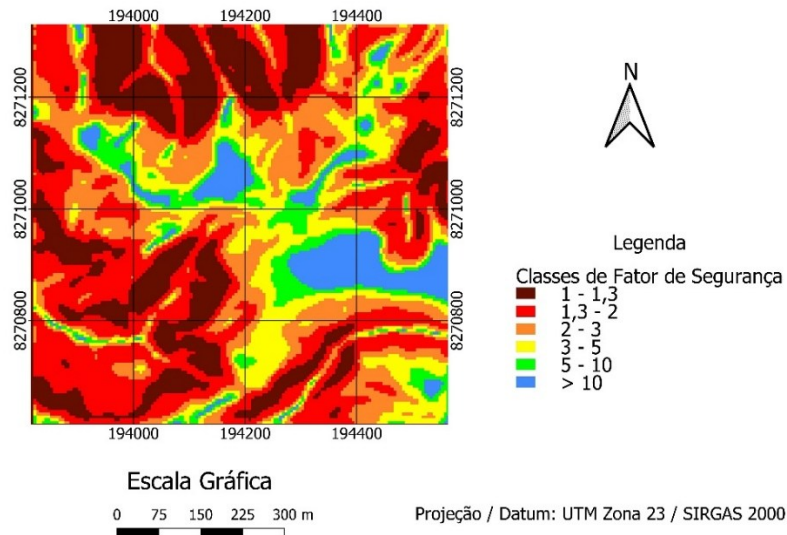


Figura 12 – Fator de segurança determinístico.

Fonte: Autores (2024).

Observou-se que o pixel com maior inclinação possui valor de fator de segurança de 1,1602, enquanto o pixel correspondente à menor inclinação possui valor de fator de segurança de 22,6179.

5. Considerações finais

Com base na análise das probabilidades de ruptura, pode-se concluir que o método Monte Carlo produz consistentemente valores máximos mais elevados em comparação com o método FOSM, independentemente do número de simulações utilizadas. No entanto, ambos os métodos apresentam padrões de distribuição espacial semelhantes para as classes de probabilidade de ruptura. Os valores mais elevados concentram-se na região norte da área de estudo, enquanto os valores mais baixos estão agrupados na região central.

Adicionalmente, observou-se que as distribuições espaciais das probabilidades de ruptura resultantes do método Monte Carlo exibiram comportamento semelhante em todos os números de simulação. Estas distribuições apresentaram uma tendência de alinhamento com o padrão de distribuição espacial do método FOSM à medida que o número de simulações de Monte Carlo aumentava. Esta convergência nos padrões espaciais persistiu mesmo nos casos em que as probabilidades de ruptura de Monte Carlo excederam aquelas produzidas pelo método FOSM.

Além disso, observou-se que o método Monte Carlo apresentou propensão a gerar resultados elevados em regiões caracterizadas por declividades mais acentuadas. Por outro lado, em áreas com inclinações mais suaves, o método tendeu a produzir valores estreitamente alinhados com os obtidos pelo método FOSM.

Outro aspecto observado é a maneira como a probabilidade de falha de Monte Carlo evolui com a progressão das simulações, principalmente em células específicas. Variações notáveis associadas à inclinação foram discernidas. Deduziu-se que em áreas com declives mais suaves existe uma tendência da probabilidade de falha aumentar juntamente com o número de simulações. Por outro lado, em locais com declives mais acentuados, o pico da probabilidade de ruptura é alcançado com uma contagem de simulação de 100.000.

Finalmente, vale a pena enfatizar a importância da abordagem proposta no artigo para comparar dois métodos probabilísticos distintos: Monte Carlo, que se prevê produzir resultados "exatos" à medida que o número de simulações se aproxima do infinito, e FOSM, um método analítico simplificado. Apesar de produzir resultados diferentes, ambos os métodos exibiram distribuições espaciais semelhantes. Os diversos valores de probabilidade de ruptura obtidos a partir dos métodos probabilísticos decorrem do tipo de distribuição de probabilidade atribuído à variável coesão como entrada. A distribuição normal empregada no método FOSM não restringe a coesão a valores não negativos, o que distorce a distribuição de probabilidade de coesão para a esquerda e resulta em maiores probabilidades de falha em comparação aos resultados obtidos pelo método de Monte Carlo. O método de Monte Carlo emprega uma distribuição lognormal (definida para valores estritamente positivos) para coesão.

Referências

- Azevedo, G. F.; Carvajal, H. E. M.; Souza, N. M. Análise da Ameaça de Deslizamentos pelo Uso de Abordagem Probabilística Aplicada a um Modelo de Estabilidade de Taludes Tridimensional. *Revista Geociências*, v. 37, n. 3, 655-668, 2018.
- Beck, A. T. *Confiabilidade e segurança das estruturas*. Rio de Janeiro, Brasil: Elsevier, 2019. 448 p.
- Câmara, G.; Souza, R. C. M.; Freitas, U. M.; Garrido, J.; Mitsuo, F. Spring: integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modeling. *Journal Computers & Graphics*, v. 20, n. 1, 395-403, 1996.
- Catani, F., Segoni, S., Falorni, G. An empirical geomorphology-based approach to the spatial prediction of soil thickness at catchment scale. *Journal Water Resources Research*, v. 46, n. 5, 1-15, 2010.
- Chen C. Y.; Lee W. C. Damages to school infrastructure and development to disaster prevention education strategy after Typhoon Morakot in Taiwan. *Disaster Prevention and Management: An International Journal*, v. 21, n. 5, 541- 555, 2004.
- Cho, S. E.; Lee, S. R. Evaluation of surficial stability for homogeneous slopes considering rainfall characteristics. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 128, n. 9, 756-763, 2002.

-
- COLLINS, B. D.; ZNIDARCIC, D. Slope stability issues of rainfall induced landslides. In: LISAC, Z.; MARIC, B.; SZAVITS-NOSSAN, A. (Org.). *Geotechnical Hazards*. Rotterdam: Balkema CRC Press, 1998. p. 791-798.
- COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO DO PLANALTO CENTRAL – CODEPLAN. *Pesquisa Distrital por Amostra de Domicílios: Sobradinho II*. Organizadores: Jusçanio Umbelino de Souza *et al.* Brasília, DF: CODEPLAN, 2019.
- Cordoba, J. P.; Mergili, M.; Aristizábal, E. Probabilistic landslide susceptibility analysis in tropical mountainous terrain using the physically based r.slope.stability model. *NHESS*, v. 20, n. 1, 815-829, 2020.
- Cornell, C. C. A probability-based structural code. *Journal of the American Concrete Institute*, v. 66, n. 12, 974-985, 1969.
- Frattini, P.; Crosta, G. B.; Fusi, N.; Negro, P. Shallow landslides in pyroclastic soils: a distributed modeling approach for hazard assessment. *Journal Engineering Geology*, v. 73, n. 1, 277-295, 2004.
- Furlan, M. C.; Lacruz, M. S. P.; Sausen, T. M. Vulnerabilidade socioeconômica à ocorrência de eventos extremos: proposta metodológica. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 15., 2011, . Anais [...]. Curitiba: INPE. 2011. p. 4540-4546.
- Guidicini, G.; Nieble, C. M. *Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação*. São Paulo, Brasil: Edgard Blücher, 1984. 194 p.
- Martini, L. C. P.; Uberti, A. A. A.; Scheibe, L. F.; Comin, J. J.; Oliveira, M. A. T. Análise da suscetibilidade a processos erosivos e movimentos de massa: decisão multicriterial suportada em Sistemas de Informações Geográficas. *Revista Geologia USP Série Científica*, v. 6, n. 1, 41-52, 2006.
- Montoya, C. A. H.; Assis, A. P. Herramientas para análisis por confiabilidad en geotecnia: La teoria. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, v. 10, n. 18, 69-78, 2011.
- Montgomery, D. R.; Dietrich, W. E. A physically based model for the topographic control on shallow landsliding. *Water Resources Research*, v. 30, n. 4, 1153-1171, 1994.
- Nowak, A. S.; Collins, K. R. *Reliability of structures*, 2nd edition. Boca Raton, USA: CRC Press, 2013. 424 p.
- Reatto, A.; Martins, E.S.; Farias, M.F.R.; Silva, A.V.; Carvalho JR., O.A.C. *Mapa Pedológico Digital - SIG Atualizado do Distrito Federal Escala 1:100.000 e uma Síntese do Texto Explicativo*. Planaltina, Brasil: Embrapa, 2004, 29 p.
- TONUS, B.P.A. *Estabilidade de Taludes: Avaliação dos métodos de equilíbrio limite aplicados a uma encosta coluvionar e residual da serra do mar paranaense*. Curitiba, 2009. 147f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba-PR, 2009.
- Venancio, A. S.; Panher A. M.; Cunha C. M. L.; Machado F. B.; Soares Junior A. V. Avaliação da suscetibilidade a movimentos de massa no município de Várzea Paulista (SP) utilizando os sistemas de informação geográfica. *Geociências*, v. 32, n. 1, 81-92, 2013.
- Wyllie, D. C.; Mah, C. W. *Rock slope engineering: Civil and Mining*, 4th edition. New York, USA: Spon Press, 2004. 456 p.