
Monte-Carlo SHALSTAB: Uma abordagem probabilística para avaliação espacial de movimentos gravitacionais de massa

Monte-Carlo SHALSTAB: Uma abordagem probabilística para avaliação espacial de movimentos gravitacionais de massa

Gabriel Guerra Guaragna

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0622-7500>

Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil

E-mail: gabriel_gguara@terra.com.br

Rafael Augusto dos Reis Higashi

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0083-3913>

Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil

E-mail: rafael.higashi@ufsc.br

Rogério Cid Bastos

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3775-1516>

Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil

E-mail: rogerio.bastos@ufsc.br

Thiago Deeke Viek

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2877-1520>

Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil

E-mail: thiago.viek@gmail.com

RESUMO

Este artigo apresenta uma abordagem probabilística para a avaliação da estabilidade de encostas. O método utiliza o modelo matemático SHALSTAB como base determinística, para levar em consideração incertezas, aplica o método Monte-Carlo em conjunto com funções densidade de probabilidade (PDF). A utilização de valores médios é prática convencional na modelagem determinística, estas modelagens consideram os eventos e variáveis únicos, desconsiderando a aleatoriedade. O método Monte Carlo se apoia na lei dos grandes números, tendendo à espectância após diversas simulações. Foram executadas 100.000 simulações SHALSTAB, variando os parâmetros geotécnicos dos solos. Após cada iteração, as saídas SHALSTAB foram padronizadas utilizando uma função de distribuição cumulativa (CDF) da precipitação na área de estudo, possibilitando a geração do mapa probabilístico final. Como resultado, a área abaixo da curva ROC (AUC) foi de 0,893 e, como a padronização se deu via precipitações regionais, fez-se possível a reverter o mapeamento probabilístico traduzindo-o para precipitação crítica necessária para a desestabilização das encostas.

Palavras-chave: Probabilidade; SHALSTAB; Incerteza; Monte Carlo; Aleatoriedade;

ABSTRACT

This article presents a probabilistic approach for slope stability assessment. The method uses the SHALSTAB mathematical model as a deterministic basis, and to account for uncertainties, it applies the Monte Carlo method in conjunction with probability density functions. The use of average values is a conventional practice in deterministic modeling; these models consider events and variables as unique, disregarding randomness. The Monte Carlo method relies on the law of large numbers, tending towards expectancy after numerous simulations. 100,000 SHALSTAB simulations were executed, varying the geotechnical parameters of the soils. After each iteration, the SHALSTAB outputs were standardized using a cumulative distribution function (CDF) of precipitation in the study area, enabling the generation of the final probabilistic map. As a result, the area under the ROC curve (AUC) was 0.893, and since the standardization was done via regional precipitation, it became possible to reverse the probabilistic mapping, translating it into the critical precipitation necessary for slope destabilization.

Keywords: Probability; SHALSTAB; Uncertainties; Monte Carlo; Randomness;

INTRODUÇÃO

A urbanização produz uma transformação social significativa e envolve o movimento de pessoas das áreas rurais para as urbanas, moldando o crescimento e o estilo de vida das cidades (BEDI, 2022). Através deste processo as cidades transformam-se em um sistema de centros urbanos interconectados, com a consequente formação de uma rede global de assentamentos humanos densamente concentrada, impactando as principais dimensões do desenvolvimento social. Embora a urbanização traga desenvolvimento industrial e progresso econômico, ela também apresenta desafios como transferência ambiental, crescimento de favelas, aumento da poluição do ar e outros problemas (CHATTI et al., 2019).

Os limites impostos pelos solos são uma combinação de fatores, os quais indicam potencialidades na fragilidade do terreno. Estes fatores são geológicos, pedológicos, hidrológicos, topográficos e climáticos. A geologia combinada com a pedologia e topografia infere sobre os horizontes geotécnicos, os quais sumarizam os comportamentos geomecânicos ali contidos. São esses comportamentos que irão expressar a resistência ao cisalhamento a qual àquela unidade geotécnica irá suportar sem que rompa. Em contrapartida os fatores hidrológicos, climáticos e topográficos agem como desestabilizadores, por vezes fazendo o solo romper por saturação devido a uma chuva intensa, por estar situado em uma declividade demasiadamente elevada para àquele material ou por estar demasiadamente próximo de uma rede de drenagem. Esta dinâmica pode ser prevista com o auxílio de métodos de mapeamento que irão tentar explicar a suscetibilidade, a probabilidade ou o risco em que as encostas estão frente a possibilidade de romper. Será a partir destas previsões que os tomadores de decisão poderão planejar da melhor forma para onde expandir o território, onde alocar uma população de baixa renda ou intervir para a estabilização de uma encosta pronta para desabar. Dessa forma fica evidente a importância do mapeamento para o planejamento e prevenção de riscos futuros, sendo essencial abordar a temática da forma mais precisa possível. Acessar informações sobre probabilidade de rompimento de encostas é mitigar a incerteza inerente aos processos de deslizamento.

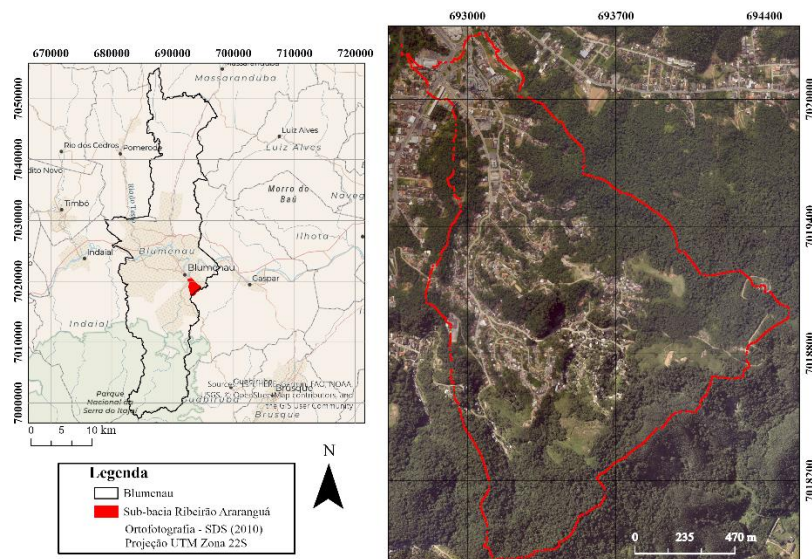
O objetivo deste trabalho é o de apresentar um conjunto de procedimentos para análise da estabilidade de taludes com utilização de conceitos de incerteza e probabilidade utilizando técnicas em SIG e programação para subsidiar a tomada de decisão a respeito dos riscos associados à ocupação urbana em territórios de fragilidade geotécnica. Os

procedimentos são aplicados nas encostas da sub-bacia do Ribeirão Araraguá, Blumenau, SC, Brasil.

ÁREA DE ESTUDO

A sub-bacia do Ribeirão Araraguá está situada no município de Blumenau, SC, Brasil (UTM:22J; E:692029.4660750; N: 7021019.8893579) - (Figura 1).

Figura 1 – Área de estudo



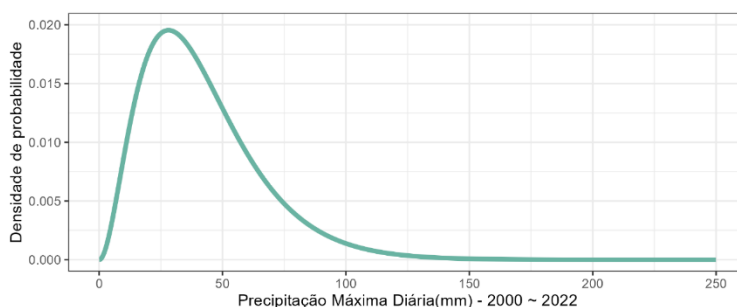
A sub-bacia está inserida em uma área altamente favorável aos movimentos gravitacionais de massa (MGM), com uma geologia propícia, uma topografia e climatologia altamente indutoras aos processos de MGM, além de profundidades de solo que propiciam MGM's rasos.

Vários fatores condicionantes e potencializadores importantes, naturais e antrópicos, dos movimentos gravitacionais de massa estão presentes na área de estudo. Entre os condicionadores destacam-se falhas, fraturas, bandamentos, foliações e tipo de rocha (geológicos); manto de intemperismo (granulometria, porosidade, permeabilidade, resistência ao cisalhamento); forte dissecação e forma da encosta (côncava, retilínea, convexa); declividade de média a alta e água de chuvas distribuídas com saturação do solo. Como fatores potencializadores há o uso e ocupação (desestabilização das encostas através de cortes e aterros; lançamento de águas pluviais e servidas; vazamentos na rede de água); lixo (deposição de entulhos e lixo a céu aberto) e cobertura vegetal (retirada e substituição por espécies que potencializam deslizamentos).

A Figura 2 relaciona as precipitações máximas diárias registradas no município de Blumenau com base em dados de estações pluviométrica (Agência Nacional de Águas,

2022), modeladas a partir da função densidade de probabilidade Gamma dos volumes máximos diários, em cada mês, no período de 2000 a 2022.

Figura 2 – Precipitações registradas. Estação meteorológica bairro Garcia – Blumenau.

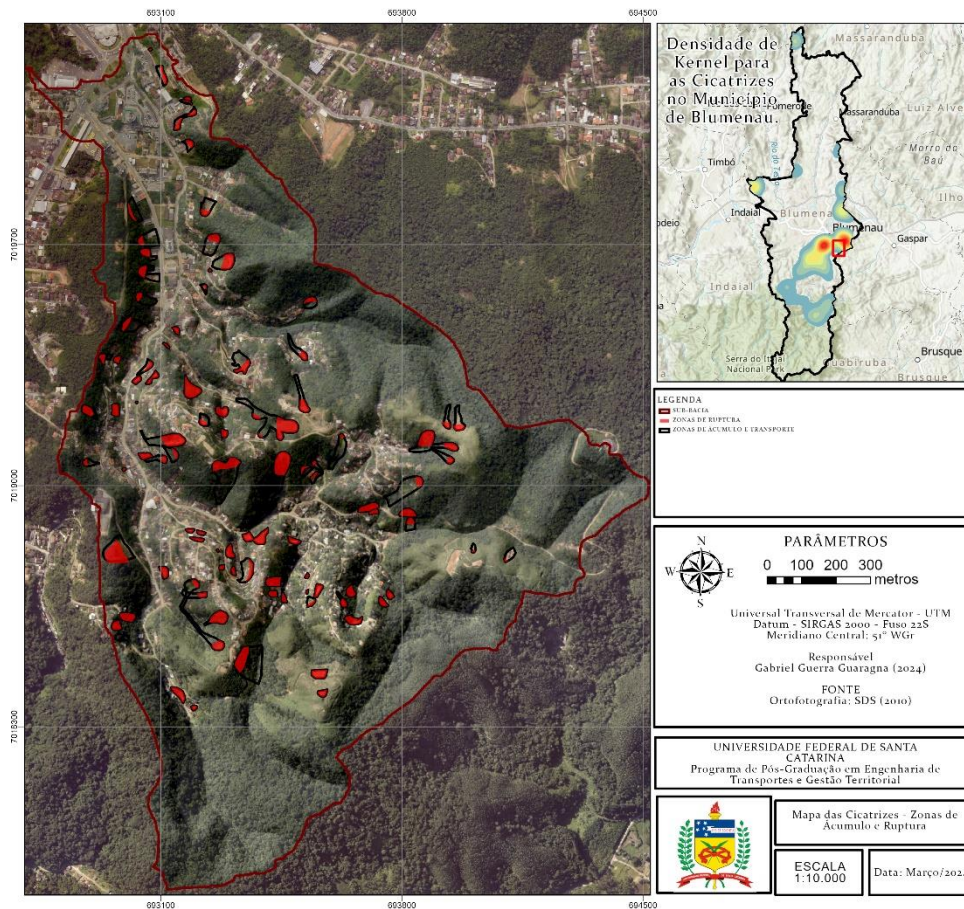


A partir do gráfico pode-se observar que a densidade de probabilidade máxima da precipitação equivale a 28.1mm de precipitação e a média para o período é de 125.45mm. Algumas datas chegam a registrar valores superando os 100 mm diários, na série há também uma anomalia extrema, ocorrida no dia 01/11/2008, com precipitação de 250,9 mm. Nesta data o município de Blumenau vivenciou um dos maiores desastres de sua história, com diversos movimentos gravitacionais de massa registrados.

Os movimentos existentes na sub-bacia, de acordo com o relatório de Blumenau (2010), são rastejos, deslizamentos, corridas, quedas/tombamentos e complexos, sendo o último a combinações de mais de um tipo de movimento gravitacional de massa. As geometrias assumidas pelos MGM também diferem, em sua maioria são planares, por vezes encontram-se geometrias em cunha. Portanto, faz-se necessário para a validação posterior a execução de uma triagem dos MGM translacionais e planares apenas, pois estes são os movimentos identificados pelo SHALSTAB. Ainda segundo o relatório, as causas internas dos MGM estão relacionadas com a redução dos parâmetros de resistência por intemperismo. As intermediárias relacionadas com a elevação do nível piezométrico, a elevação da coluna d'água em descontinuidades e a erosão subterrânea retrogressiva (“piping”). As externas são relacionadas com a mudança na geometria do sistema. A profundidade média dos perfis dos MGM é de 5m e todos ocasionam algum tipo de dano, seja a bens públicos, privados ou ambos. Os limites internos dentro da encosta, quando possível a observação, foram o contato solo/rocha e o contato solo/solo e os limites laterais variáveis em função da rugosidade da encosta e das estruturas geológicas. (BLUMENAU, 2010).

O registro de MGM's é feito pela Defesa Civil de Blumenau e conta com 1415 feições. Deste dataset foram extraídas as feições existentes na área da sub-bacia (Figura 3).

Figura 3 – Cicatrizes de MGM's na área da Sub-bacia.



MATERIAIS

A base topográfica utilizada foi o modelo digital de terreno (MDT) da Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico Sustentável de Santa Catarina – SDS (2010), com resolução espacial de 1 metro. A partir do MDT foram extraídas as curvas de nível que foram utilizadas para a construção de uma malha triangular (TIN). Do TIN novamente foram extraídas as curvas de nível, das quais foi construído o MDT hidrologicamente correto com 1,1m de resolução espacial. A razão deste processo se deu, pois, o MDT da SDS (2010) não é contínuo nem suavizado.

O mapa geológico foi construído a partir do mapeamento GERCO (2002), na escala 1:100.000, e do mapa geológico de Pozzobon (2013), na escala 1:250.000. Já o mapa pedológico foi construído através de interpretação em campo a partir de pontos de observação.

A aquisição da condutividade hidráulica saturada não se deu em campo, diferentemente dos parâmetros de resistência ao cisalhamento. Este parâmetro foi estimado utilizando funções de pedotransferência a partir de curvas granulométricas dos

solos na área de estudo, utilizando o modelo desenvolvido por Zhang e Schaap (2017) - Rosetta 3. O modelo é *open source* e pode ser acessado através do link: <https://soil-modeling.org/resources-links/model-portal/rosetta>.

Os dados geotécnicos foram adquiridos através de um mapa geotécnico construído de acordo com a metodologia de Dias (1995) e retificado em campo. As amostras deformadas e indeformadas, além da aquisição de parâmetros de resistência ao cisalhamento por meio do Borehole Shear Test - BST (para mais informações, consulte Lutenecker, 2021; Flach, 2020) foram guiadas através deste mapa.

Para as análises foi escrito um código em C++ que gera mapas SHALSTAB em diferentes formas: Determinístico (usando os valores médios dos parâmetros, Estatísticos (média, moda e mediana) e probabilístico. Neste trabalho o foco se deu apenas para o probabilístico.

Ademais, foram utilizados os softwares ArcGis 10.3, Qgis 3.16.8, R e Excel 2016 para edições e geração de gráficos.

MÉTODO

A Teoria SHALSTAB

SHALSTAB é a abreviação de *Shallow Landslide Stability Analysis*, um modelo determinístico desenvolvido por Dietrich e Montgomery (1998) utilizado para o mapeamento de áreas suscetíveis a escorregamento translacionais rasos. O SHALSTAB é composto por dois outros modelos, o de encosta infinita, e o hidrológico de estado uniforme. O primeiro utiliza parâmetros geotécnicos e topográficos, enquanto o segundo utiliza parâmetros geomorfológicos e hidrológicos com o fim de estimar a saturação do terreno (MICHEL, 2013). Diversos autores aplicaram o modelo em suas análises e concluíram bons resultados, entretanto nenhum considerou a incerteza em suas análises, campo ainda pouco explorado utilizando este modelo.

De acordo com Michel (2013) a teoria de encostas infinitas é empregada para escorregamentos translacionais rasos, onde a profundidade da superfície de ruptura é relativamente rasa comparada ao comprimento da encosta. O modelo considera os vários fatores que influenciam a probabilidade de ocorrência de um deslizamento raso (Guzzetti et al., 2020). Os componentes principais deste modelo incluem geometria de encostas, propriedades do solo e condições hidrológicas.

O modelo de encostas infinitas apoia-se na lei de Mohr-Coulomb e gera duas situações extremas no modelo SHALSTAB em função da relação entre a profundidade do solo e a altura da coluna d'água. A Eq. (1) representa a situação incondicionalmente estável, quando o relevo não é acidentado o suficiente para causar uma ruptura, mesmo que se encontre totalmente saturado. Em contrapartida a Eq. (2) representa a condição incondicionalmente instável onde a encosta possui uma declividade tão elevada que propicia a ruptura, mesmo que não haja saturação do solo.

$$\tan \theta \leq \tan \phi \cdot \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_s}\right) + \frac{c}{\cos^2 \theta \cdot \rho_s \cdot g \cdot z} \quad (1)$$

$$\tan \theta \geq \tan \phi + \frac{c}{\cos^2 \theta \cdot \rho_s \cdot g \cdot z} \quad (2)$$

Onde θ é a declividade ($^\circ$), ϕ é o ângulo de atrito interno do solo, ρ_a é a densidade da água (kg/m^3), ρ_s é a densidade do solo (kg/m^3), c é a coesão efetiva do solo, g é a aceleração da gravidade (m/s^2), z é a profundidade do solo (m).

O'Loughlin (1986) desenvolveu o modelo hidrológico denominado TOPOG que viria a ser utilizado na definição do SHALSTAB, modelo este que assume um estado uniforme de recarga. Segundo Guimarães et al. (2013), no modelo TOPOG considera-se que o fluxo de água se infiltra até um plano de mais baixa condutividade hidráulica, em geral o contato solo-rocha, onde seguirá um caminho determinado pela topografia.

A umidade (*wetness*) foi definida por O'Loughlin (1986) como a parcela saturada do solo em um dado estado uniforme de recarga, sendo assim o nível de saturação do solo é obtido através da relação entre a água que entra no sistema sob forma de recarga uniforme e a água que sai através da camada saturada do solo. A formulação final do modelo TOPOG é apresentada na Eq. (3) onde T representa a transmissividade do solo (m^2/d) – Eq. (4), que representa a capacidade do solo de drenar a água para fora do sistema.

$$W = \frac{q}{T} \cdot \frac{a}{b \cdot \sin \theta} \quad (3)$$

$$T = K_s \cdot z \cdot \cos \theta \quad (4)$$

A formulação matemática completa dos modelos pode ser consultada nas referências citadas neste capítulo.

A combinação do modelo TOPOG e o de encostas infinitas gera o modelo matemático SHALSTAB. A formulação final do modelo é apresentada na Eq. (5) onde os parâmetros livres, q e T denotam os níveis de suscetibilidade. É possível ainda isolar q da equação, levando-se em conta então a possibilidade de atenuação ou não do nível de

suscetibilidade, visto que T representa a capacidade do solo de reter ou transmitir a água para fora do sistema.

$$\log \frac{q}{T} = \frac{\sin \theta}{a/b} \cdot \left[\frac{c}{\rho_a \cdot g \cdot z \cdot \cos^2 \theta \cdot \tan \phi} + \frac{\rho_s}{\rho_a} \cdot \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi} \right) \right] \quad (5)$$

As propriedades do solo, como tipo de solo, teor de umidade e coesão, também desempenham um papel crucial na estabilidade de deslizamentos rasos (Guzzetti et al., 2020). Solos com baixa coesão e alto teor de umidade são mais suscetíveis a falhas, pois a resistência reduzida do solo e o aumento da pressão da água nos poros podem levar à instabilidade do talude.

As condições hidrológicas, incluindo padrões de precipitação, níveis de água subterrânea e fluxo de água superficial, podem impactar significativamente a estabilidade de deslizamentos rasos (Sidle & Ochiai, 2006). O aumento da precipitação ou níveis elevados de água subterrânea podem levar a um aumento na pressão da água nos poros, reduzindo a resistência ao cisalhamento do solo e aumentando a probabilidade de ocorrência do deslizamento.

A gestão dos riscos de deslizamentos superficiais requer uma abordagem abrangente que considere a interação destes componentes-chave. Estratégias de gestão eficazes podem incluir:

1. **Técnicas de estabilização de encostas**, tais como a instalação de muros de contenção, sistemas de drenagem ou cobertura vegetal, para abordar a geometria das encostas e as propriedades do solo (Sidle & Ochiai, 2006).

2. **Sistemas de monitoramento e alerta precoce** para rastrear as condições hidrológicas e identificar potenciais desencadeadores de deslizamentos de terra (Guzzetti et al., 2020).

3. **Regulamentações de ordenamento do território** e zoneamento para restringir o desenvolvimento em áreas de alto risco e orientar práticas sustentáveis de gestão da terra (Sidle & Ochiai, 2006).

4. **Planos de resposta a emergências e de gestão de desastres** para garantir ações oportunas e coordenadas em caso de deslizamento superficial (Guzzetti et al., 2020).

Ao compreender os principais componentes do modelo de estabilidade de deslizamentos rasos e ao implementar estratégias de gestão abrangentes, os decisores podem mitigar eficazmente os riscos colocados por este perigo natural e proteger as comunidades, as infra-estruturas e o ambiente.

O MÉTODO MONTE CARLO

De forma geral, o tratamento de incertezas pode se dar por intermédio de:

1) Análise de Sensibilidade; 2) Métodos de Monte Carlo; 3) Análise Bayesiana.

Evidentemente, devem ser observadas a presença de condições específicas associadas a hidrologia (fator crítico de estabilidade em encostas), vegetação (atuam sobre a estabilidade da encosta) e mudanças temporais (devido a processos de erosão ao longo do tempo ou mesmo mudanças no uso da terra).

Simulação Monte Carlo é o termo aplicado a simulações estocásticas, quer discretas, em tempo real, ou alguma combinação delas, que incorporam variabilidade aleatória no modelo (BONATE, 2001). É uma técnica utilizada para desenhar cenários de um evento aleatório e atribuir probabilidades a estes cenários para ajudar nas tarefas de tomada de decisão. É um dos métodos numéricos mais versáteis e amplamente utilizados (CAFLISCH, 1998).

A técnica simula repetidamente o modelo, desenhando cada vez um conjunto aleatório de valores (inputs) diferente da distribuição de amostras dos parâmetros do modelo, cujo resultado é um conjunto de resultados possíveis (outputs) (BONATE, 2001). Segundo Costa (2005), a abordagem do método de Monte Carlo pode ser delineada em algumas etapas, são elas:

Seleção do modelo determinístico base para a determinação da função desempenho;

Tomada de decisão sobre quais parâmetros serão modelados probabilisticamente e a definição das distribuições de probabilidade que serão utilizadas nas variáveis de entrada;

Estimativa dos parâmetros de entrada no modelo determinístico adotado. Isto pode ser feito utilizando um falso gerador de números aleatórios que seleciona um número aleatório para cada variável de entrada baseado na sua distribuição de probabilidades;

O processo é repetido diversas vezes com o intuito de se construir a distribuição de frequências da variável de desempenho.

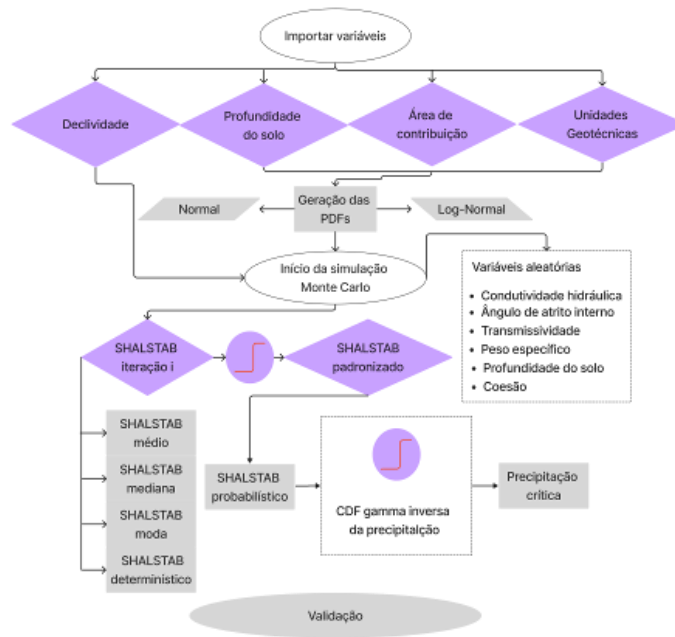
A lógica por trás do método é que se pode estimar o valor esperado E de uma variável aleatória $X(s)$, onde s é uma amostra do espaço de distribuição $P(X)$, avaliando o resultado mais frequente ao amostrar os resultados do evento muitas vezes (CLARE, 2022). Desta forma, ao utilizar diferentes conjuntos de entradas no modelo simulado, é

possível coletar dados para desenhar a função densidade de probabilidade (PDF) do modelo.

SIMULAÇÃO E GERAÇÃO DAS PDFs

O fluxograma apresentado na Figura 4 representa o método deste trabalho.

Figura 4 – Método Monte Carlo SHALSTAB.



As variáveis necessárias para os cálculos SHALSTAB consideradas incertas são definidas e funções densidade de probabilidade são construídas a partir dos dados adquiridos. A Tabela 1 apresenta as PDFs selecionadas para cada variável.

Tabela 1 - Variáveis incertas e PDFs

Variáveis	PDF
Coesão (N/m ²)	Log-normal
Ângulo de atrito interno (°)	Log-normal
Peso específico (kN/m ³)	Gaussiana (normal)
Condutividade hidráulica saturada (m/d)	Log-normal
Profundidade do solo (m) - z	Gaussiana (normal)

Os parâmetros geotécnicos são generalizados em polígonos (método de DIAS, 1995) que devem se comportar geotécnicamente de forma semelhante, todavia os polígonos podem não representar a área exata de determinado tipo de solo e também, não representam a variação espacial contínua dos parâmetros em um meio natural.

Outra observação é a de que poucos testes não explicam a variabilidade geral de uma determinada área. Seriam precisos infinitos pontos amostrais para que se pudesse superar tal incerteza.

A profundidade do solo foi estimada a partir de um método empírico, portanto, tem-se por certo que esta variável é incerta e não representa a variabilidade espacial real da área de estudo.

A simulação Monte Carlo permitirá que se crie uma falsa continuidade nos dados pois, em cada iteração do modelo haverão diferentes combinações de parâmetros, sempre dentro do espaço amostral.

Em cada iteração (i) valores aleatórios das PDFs são selecionados. Estes valores são aplicados para cada elemento das matrizes correspondentes e então, para a iteração i, o SHALSTAB é calculado. O resultado da iteração é salvo e o processo se repete.

No fluxograma apresentado citam-se os mapas estatísticos e determinístico, estes não serão discutidos neste trabalho. O ápice do método é a geração do mapa probabilístico, que em cada iteração, além do processo citado anteriormente, passa por uma padronização.

O modelo SHALSTAB apresenta incertezas inerentes. A incerteza relacionada aos parâmetros faz com que os resultados do modelo também sejam incertos. Como não há certeza em relação aos parâmetros de entrada, deve-se considerar incertezas nos valores de suscetibilidade gerados.

O SHALSTAB corriqueiramente é classificado segundo Dietrich e Montgomery (1998), entretanto o modelo retorna valores contínuos entre + 10 e -10. Quanto mais positivo o valor, mais estável e quanto mais negativo, mais instável. As classes incondicionais são atribuídas aos valores extremos.

Os valores retornados pelo SHALSTAB, se relacionados com a transmissividade, indicam quantidades de precipitação necessárias para saturar o solo e possivelmente causar um rompimento na encosta.

Para levar em consideração a continuidade SHALSTAB e a relação com a precipitação, cada iteração no modelo calcula o SHALSTAB e padroniza o resultado de acordo com uma função de ativação ($P_{(st)}$). Quanto mais negativo o valor, menor a quantidade de precipitação requerida para que a encosta se instabilize, portanto, maior a probabilidade de rompimento.

Levando em consideração a relação entre a precipitação e as classes SHALSTAB em Dietrich e Montgomery (1998), relaciona-se as precipitações da área de estudo com os retornos SHALSTAB através de uma CDF gamma. A CDF foi construída levando-se

em consideração as precipitações máximas diárias, mês a mês, registradas no município de Blumenau em um período de 10 anos.

O mapa probabilístico final é calculado a partir dos cenários SHALSTAB padronizados gerados, utilizando o conceito da lei dos grandes números Eq. (6).

$$pf = \frac{\sum_{i=1}^k w_i \times o_i}{n} \quad (6)$$

Onde p_f é a probabilidade de falha (%); k é o número total de diferentes pesos $P_{(st)}$ observados; w_i é o peso $P_{(st)}$ do pixel específico; o_i é o número de vezes que o peso w_i ocorreu; n é o número total de iterações.

O processo é repetido recursivamente para cada elemento da matriz gerando o mapa probabilístico final.

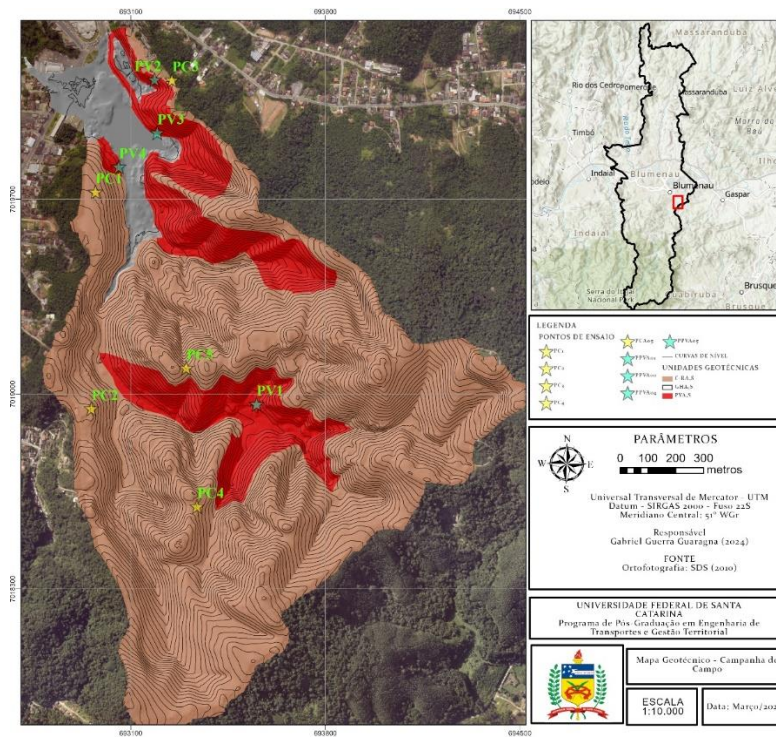
Por fim, ao relacionar as probabilidades do mapa gerado com as probabilidades da CDF gamma da precipitação faz-se possível traduzir os elementos da matriz para valores de precipitação, gerando o mapa de precipitação crítica, que indica quantidades de precipitação necessárias para desestabilizar a encosta.

MAPA GEOTÉCNICO E PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA

A partir dos pontos visitados em campo (pontos PC e PV), análise do relatório técnico de Blumenau (2010) e caminhamento pela área de estudo, três UGs com respostas geotécnicas semelhantes foram estabelecidas. A Figura 5 apresenta o mapa geotécnico e os pontos visitados onde foram coletadas amostras deformadas, indeformadas e executado o BST para aquisição dos parâmetros de resistência ao cisalhamento.

As nomenclaturas adotadas provêm do método de Dias (1995); portanto, a pedologia é chamada em letras maiúsculas e a geologia em letras minúsculas. As unidades geotécnicas presentes na área de estudo são C-Ra,s (Cambissolo-Neossolo de substrato de arenito com subordinação de siltitos); PVa,s (Podzólico de substrato de arenito vermelho-amarelo com subordinação de siltitos); e GHa,s (Gleissolo de substrato de arenito com subordinação de siltitos).

Figura 5 – Mapa Geotécnico.



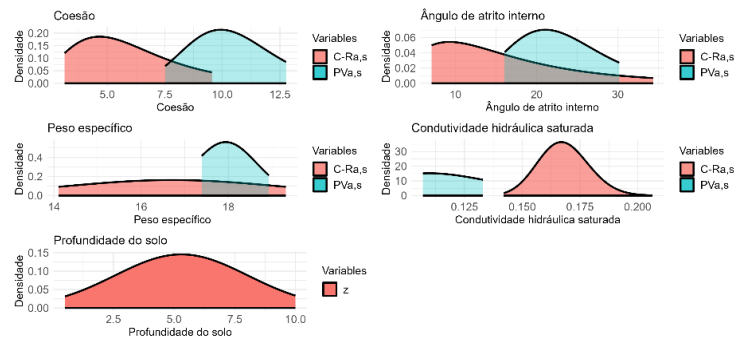
A execução do BST permitiu aferir os parâmetros de resistência coesão e ângulo de atrito interno dos solos a partir de envoltórias de ruptura para cada ponto de ensaio. Na Tabela 2 apresenta-se um resumo dos resultados para cada UG.

Tabela 2 - Estatísticas descritivas das propriedades geotécnicas

Variáveis	Máximo	Mínimo	Média	Desvio padrão
Coesão (kN/m ²)	-	-	-	-
C-Ra,s	9,55	3,15	6,09	2,68
PVa,s	12,77	7,52	10,46	1,95
Ângulo de atrito interno (°)	-	-	-	-
C-Ra,s	34,33	7,05	17,25	12,38
PVa,s	30,18	16,05	23,31	6,17
Peso específico (kN/m ³)	-	-	-	-
C-Ra,s	19,32	14,11	16,71	2,44
PVa,s	18,93	17,39	17,94	0,71
Condutividade hidráulica (m/d)	-	-	-	-
C-Ra,s	0,208	0,142	0,168	0,011
PVa,s	0,133	0,107	0,119	0,028
Profundidade do solo	10	0,5	5,30	2,74

O uso de funções densidade de probabilidade visa superar incertezas relacionadas aos dados e à sua espacialidade, usados nas simulações. Usando as distribuições da Figura 6 em várias iterações, são criados diferentes cenários possíveis com diferentes combinações de parâmetros, porém, sempre dentro do espaço amostral.

Figura 6 – PDFs das dos parâmetros incertos.



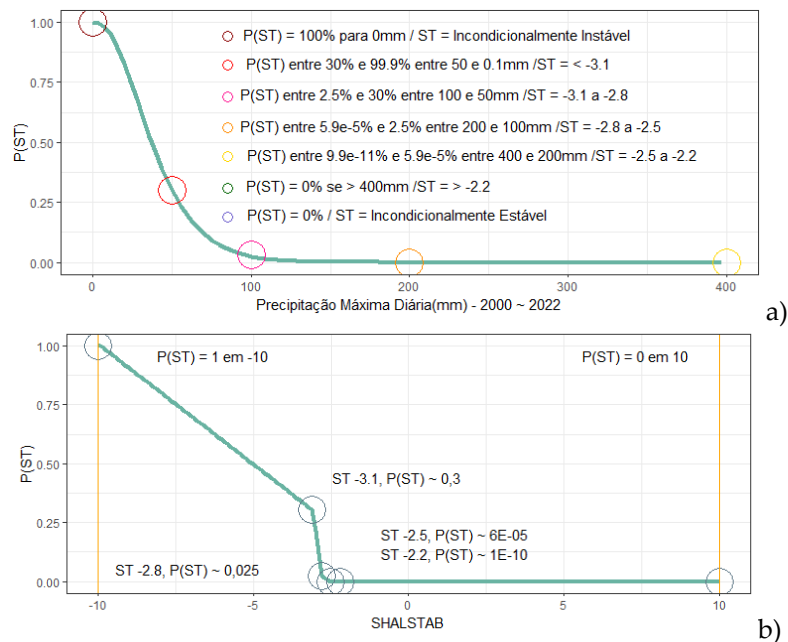
FUNÇÃO DE ATIVAÇÃO

A Figura 7a apresenta a CDF gama invertida relacionada às classes do SHALSTAB (ST) para uma série temporal de dados de precipitação máxima diária entre 2000 e 2022 em Blumenau (Agência Nacional de Águas 2024)

A Figura 7b mostra a tradução das probabilidades de precipitação em uma interpolação linear dos valores de SHALSTAB. Essa é a função de ativação final usada para criar o mapa probabilístico SHALSTAB.

Vale ressaltar que é possível modelar diferentes cenários considerando esse tipo de função de ativação, como, por exemplo, considerar dados de precipitação com base horária.

Figura 7 – Função de ativação. a) CDF de precipitação inversa, b) Interpolação linear nos valores de SHALSTAB para a CDF.



A função de ativação poderia ser aprimorada se dados de campo ideais para k_s e z tivessem sido adquiridos. Assim, seria possível definir com mais certeza a

transmissividade e, portanto, definir limites de precipitação locais. Ainda assim, segundo Michel (2013), o modelo foi aplicado, calibrado e validado em diversas bacias na Califórnia. Portanto, o SHALSTAB foi projetado para gerar resultados satisfatórios em uma ampla variedade de casos utilizando a classificação padrão baseada na transmissividade de $65\text{m}^2/\text{d}$.

Um cenário interessante que poderia ser modelado é a definição de uma distribuição de eventos climáticos futuros. Se disponíveis dados sobre previsões de precipitação, por exemplo, uma semana no futuro, é possível usar esses dados para modelar como a área responderá ao evento climático. Em seguida, é possível comparar um modelo dados de precipitação histórica com esse novo mapa futuro e se ter uma ideia da instabilidade que será gerada na área.

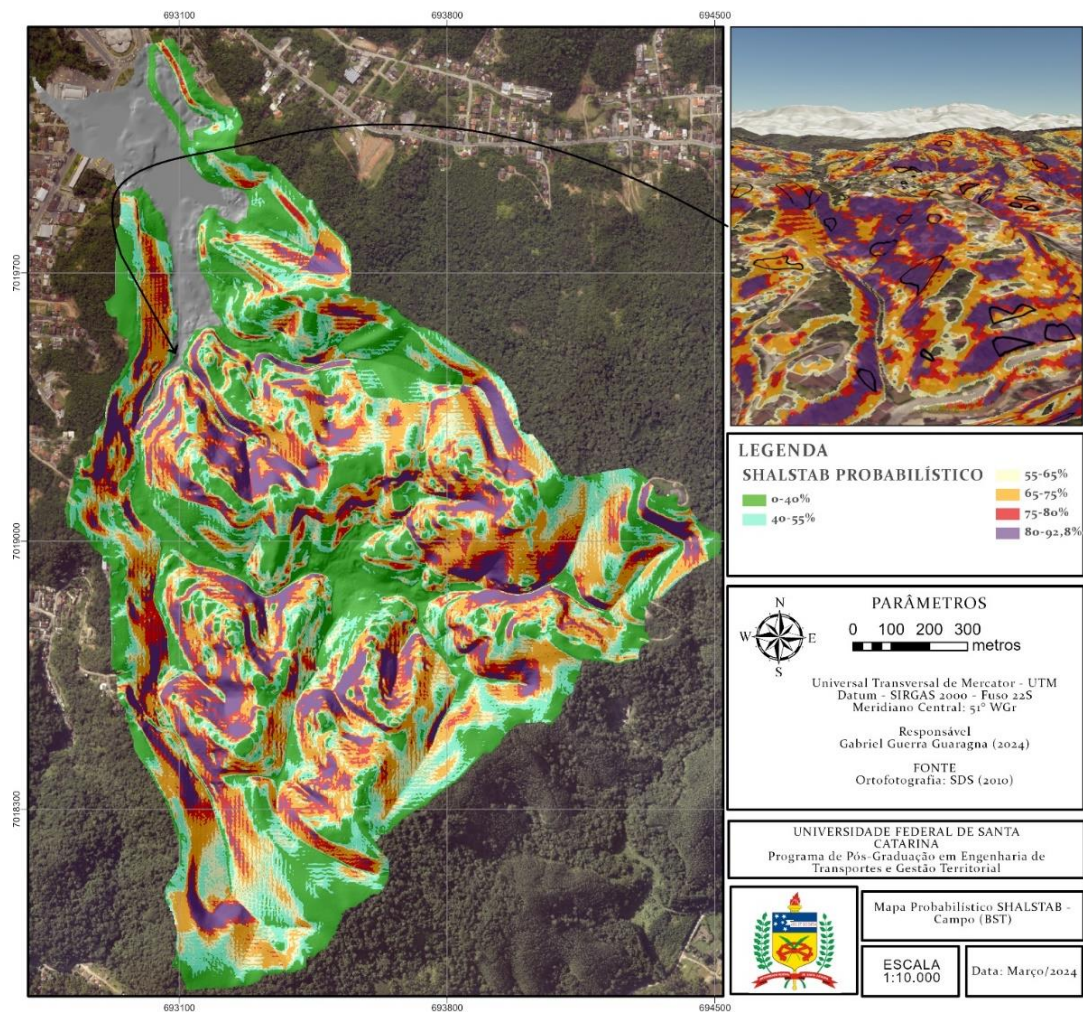
SHALSTAB PROBABILÍSTICO E PRECIPITAÇÃO CRÍTICA

O mapa probabilístico (Figura 8) foi construído após 100.000 simulações SHALSTAB, variando os parâmetros de acordo com o espaço amostral das PDFs.

Segundo El-ramly (2001) a definição da estabilidade de taludes é um problema dominado por incertezas. Anomalias geológicas, propriedades dos materiais, condições ambientais e os próprios modelos analíticos são fatores que contribuem para a incerteza. Os métodos convencionais não levam em consideração a incerteza e, portanto, comprometem as predições. Outro fator importante é a variabilidade dos parâmetros do solo. Esses parâmetros mudam continuamente no espaço e no tempo. Eventos como chuvas podem reduzir a coesão do solo e aumentar o peso específico da massa do solo, elevando, conseqüentemente, as forças de cisalhamento. Fiori (2015) destaca que se deve ter em conta que as propriedades físicas podem variar muito em função de condições externas, como, por exemplo, quantidade de chuva, ocupação antrópica, etc. Da mesma forma, as propriedades mecânicas podem variar de forma sensível com o tempo, método de análise e condições externas. Uma pequena variação de seus valores pode influir consideravelmente na distribuição dos esforços e na natureza do equilíbrio, modificando radicalmente a segurança dos implantes ou obras

Em qualquer ponto de um terreno, há infinitas combinações de parâmetros, informações que não são possíveis de capturar com os métodos de teste atuais. Assim, mesmo generalizando em polígonos áreas com comportamento geotécnico semelhante, é possível aproximar a tendência real da natureza.

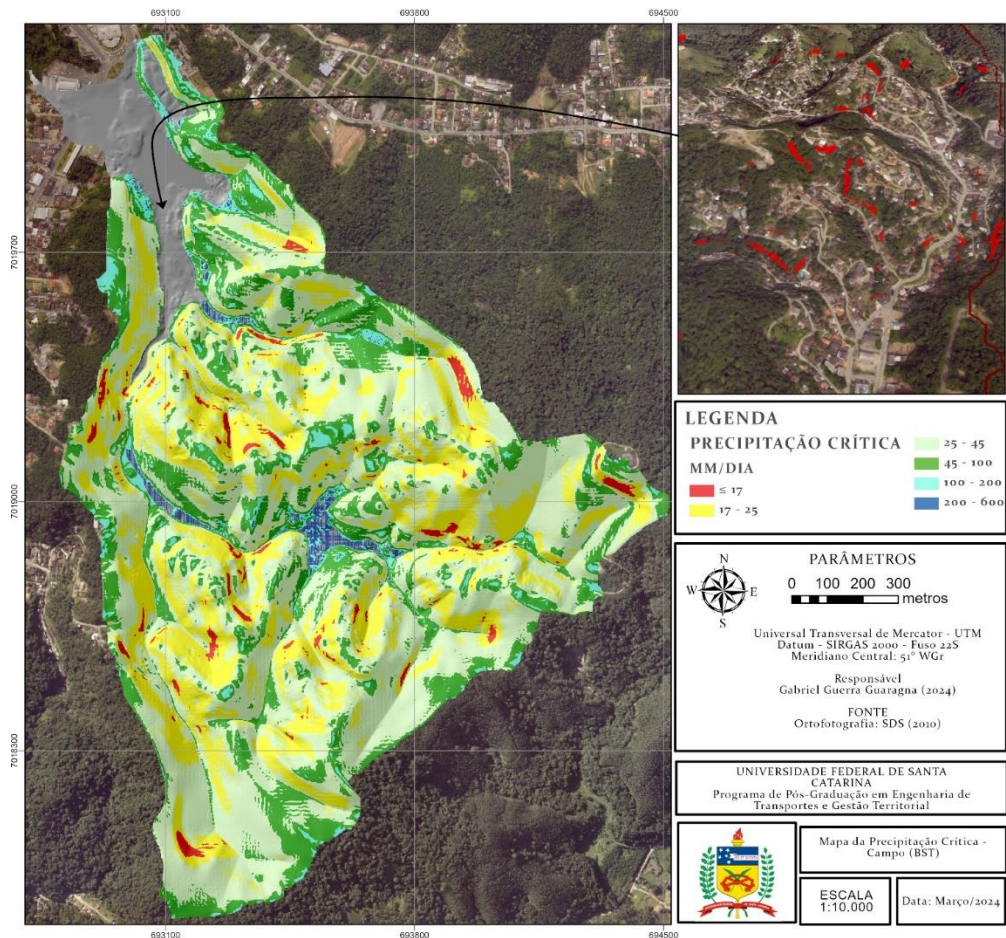
Figura 8 – Mapa probabilístico final.



Quanto ao mapeamento da precipitação crítica, para cada pixel no mapa SHALSTAB probabilístico, comparamos o valor da probabilidade com a precipitação na CDF de precipitação, gerando o mapa mostrado na Figura 9. Este mapeamento é apenas a tradução das probabilidades para valores de precipitação, algo possibilitado pela função de ativação utilizada ao padronizar os resultados da simulação Monte Carlo SHALSTAB.

Embora existam diferentes maneiras de expressar a situação de risco, como o uso do fator de segurança (FS), índices de suscetibilidade ou probabilidades, a última opção é mais compreensível para a maioria das pessoas, pois é um conceito universalmente conhecido. O mapeamento da precipitação crítica por sua vez é de extrema importância pois a maior parte da população sabe e relaciona a precipitação como um fator crucial na ocorrência de movimentos gravitacionais de massa, evitando então que haja dúvidas subjetivas.

Figura 9 – Mapeamento de Precipitações Críticas.



VALIDAÇÃO E AVALIAÇÃO DE EFICIÊNCIA

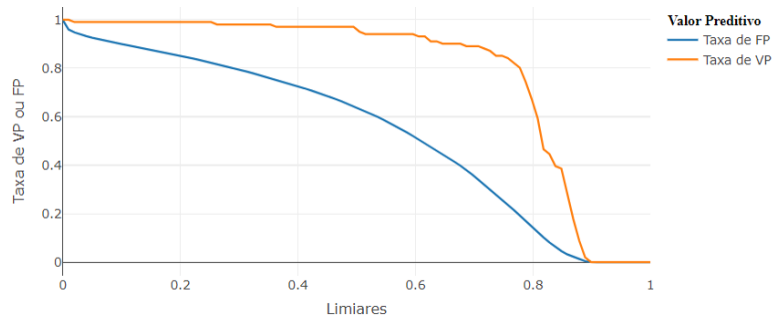
Um dos processos mais importantes na análise de estabilidade de taludes é avaliar o desempenho do modelo. Isso é feito comparando o modelo com a verdade de campo, que são os escorregamentos conhecidos na área. Para tal, usualmente são utilizadas as estatísticas: Verdadeiro positivo (VP), Falso positivo (FP), Verdadeiro negativo (VN) e Falso negativo (FN).

Para testar como os diferentes limiares afetam as estatísticas da matriz de confusão e definir com maior certeza o melhor limiar possível, foi construído o gráfico da Figura 14.

O gráfico da Figura 10 é teórico e tem como objetivo auxiliar na definição de limiares ótimos. Para esta pesquisa, o limiar de 0,8 foi utilizado, observa-se uma taxa de VP alta e um taxa de FP baixa. Caso o limite escolhido fosse 0,7, a taxa de VP seria de 0,89, mas a taxa de FP seria de 0,36. O significado disto é que no mapa probabilístico

apresentado, probabilidades maiores ou iguais a 80% representariam de fato a possibilidade de ocorrência de escorregamentos na área de estudo.

Figura 10 – Variação de limiares.



O gráfico ROC (*Receiver Operating Characteristic*) e a AUC (*Area Under the ROC Curve*) representa uma métrica estatística para avaliação do modelo. O ROC e AUC são comumente utilizados por pesquisadores para avaliar os modelos preditivos.

A Figura 10 mostra as curvas ROC, bem como o respectivo valor de AUC para o modelo. Foram traçados dois casos: O ROC vermelho é para o mapeamento de forma contínua, sem nenhum tipo de classificação, e a curva ROC cinza é o resultado da classificação do mapeamento mostrada na Figura 11.

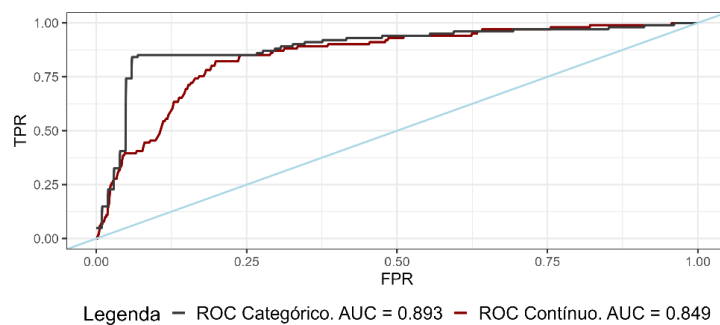


Figura 11 – Análise ROC/AUC

Como pode ser visto, o modelo alcançou valores de AUC consideravelmente elevados, comprovando sua eficiência em determinar áreas instáveis onde há deslizamentos. O modelo classificado, com o limite definido, conseguiu atingir uma AUC de 0,893.

Quanto ao mapeamento de precipitações críticas, como as informações são uma tradução das probabilidades do mapa probabilístico em relação à CDF, espera-se que os resultados sua eficiência seja relacional ao mapeamento probabilístico. Todavia, caso na área de estudo estivessem disponíveis informações de precipitação no momento em que os movimentos ocorreram, poderia ser feita uma análise estatística para definir se os

valores de precipitação apresentados no mapeamento de fato condizem com o volume ocorrido. Isto é algo que terá que ser tratado em estudo futuros.

CONCLUSÕES

Neste trabalho é apresentado um modelo probabilístico para setorização de áreas instáveis em um dado terreno. A concepção do modelo levou em consideração o conceito de incertezas relacionadas à geotecnia e do próprio modelo determinístico base incorporado.

O mapeamento gerado é um recorte da resposta do terreno dado a história das precipitações máximas diárias registradas no município nos últimos 22 anos. Desta relação, foi possível além de gerar um mapa probabilístico, gerar um mapa indicativo de quantidades de precipitação necessárias para causar a instabilidade no local, com uma probabilidade associada para a sua ocorrência. O resultado pode indicar uma precipitação de 20mm/dia, por exemplo, mas atrelado a essa quantidade há também uma probabilidade de que a movimentação ocorra caso esse volume de fato venha a ocorrer. Outra perspectiva importante é a de que se faz possível definir cenários de precipitação e obter a resposta do terreno. Caso seja registrado uma intensidade de 20mm em 15 minutos a resposta do terreno será diferente de uma intensidade de 5mm em 15 minutos. Da mesma forma, o cenário cumulativo pode ser incorporado no modelo. Se houver um registro de precipitação de 200mm acumulados em 3 dias existirá uma resposta diferente de se houver um cenário acumulado de 100mm.

O modelo foi definido com o intuito de ser utilizado como um sistema de monitoramento, portanto há a possibilidade de atrelar ao modelo previsões do tempo para que se possa saber com antecedência quais regiões em uma dada área poderão ser instáveis e qual a probabilidade de ocorrência de uma movimentação caso o volume de precipitação ocorra. Do ponto de vista da tomada de decisão em relação aos eventos extremos, o método permite a mais rápida interpretação dos resultados e confiança dos mesmos devido ao fato de que a interpretação subjetiva de índices adimensionais é ultrapassada ao se considerar a probabilidade. O SHALSTAB fornece números subjetivos como índices demonstrando estabilidade ou instabilidade, o que pode causar confusão para um gestor público, projetista ou analista que não esteja familiarizado com o método. A probabilidade ou estocasticidade é uma informação diferente, ela indica uma

probabilidade, após um conjunto de simulações de que uma dada área poderia ser instável. Assim, contribui-se com a política de solo no sentido de possibilitar maior robustez e velocidade no mapeamento de áreas potencialmente de risco.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o financiamento da CAPES DS.

REFERÊNCIAS

BLUMENAU. Carta de Uso Recomendado do Solo (Área 09) Região Rua Araranguá e Transversais. Blumenau: Secretaria Municipal de Planejamento Urbano Diretoria Geologia, 2010. 2 p. Relatório técnico concedido pela defesa civil do município, não publicado e de uso interno.

BEDI, P.; GOYAL, S. B.; ISLAM, S. M.; LIU, J.; BUDATI, A. K. Performance analysis of machine learning and deep learning algorithms for smart cities: the present state and future directions. *Cognitive Computing Models in Communication Systems*, p. 15, 2022.

BONATE, P. L. A brief introduction to Monte Carlo simulation. *Clinical Pharmacokinetics*, v. 40, n. 1, p. 15–22, 2001.

CAFLISCH, R. E. Monte Carlo and quasi-Monte Carlo methods. *Acta Numerica*, v. 7, p. 1–49, 1998. Cambridge University Press.

CHATTI, W.; SOLTANE, B.; TURKI, A. Impacts of Public Transport Policy on City Size and Welfare. *Networks and Spatial Economics*, v. 19, 1 dez. 2019.

CLARE, M. C. A.; LEIJNSE, T. W. B.; MCCALL, R. T.; et al. Multilevel multifidelity Monte Carlo methods for assessing uncertainty in coastal flooding. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v. 22, p. 2491–2515, 2022.

COSTA, E, A, da. VALIAÇÃO DE AMEAÇAS ERISCO GEOTÉCNICO APLICADOS À ESTABILIDADE DE TALUDES. 160 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

DIAS, R. D. Proposta de metodologia de definição de carta geotécnica básica em regiões tropicais e subtropicais. *Revista do Instituto Geológico*, v. 16, n. esp, p. 51–55, 1995.

DIETRICH, W. E.; MONTGOMERY, D. R. SHALSTAB: a digital terrain model for mapping shallow landslide potential. Publication NCASI (National Council of the Paper Industry for Air and Stream Improvement), 1998. 29p.

EL-RAMLY, H. Probabilistic Analyses of Landslide Hazards and Risks: Bridging Theory and Practice. 2001. 420 f. Tese (Doutorado) - Curso de Geotechnical

Engineering, Department Of Civil And Environmental Engineering, University Of Alberta, Edmonton, 2001.

FIORI, A. P. Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas - 3ª ed. 3º ed. Oficina de Textos, 2015.

FLACH, M, K. Comparação entre os dados obtidos pelo borehole shear teste ensaio de cisalhamento direto no mapeamento de áreas suscetíveis a deslizamentos na microbacia do Ribeirão Baú, Ilhota/SC. 151 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes e Gestão Territorial, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2020.

GUIMARÃES, R, F *et al.* FUNDAMENTAÇÃO TÉORICA DO MODELO MATEMÁTICO PARA PREVISÃO DE ESCORREGAMENTOS RASOS SHALLOW STABILITY. **Espaço & Geografia**, v. 6, nº 2, p. 133-150, 2003.

Guzzetti, F., Gariano, S. L., Peruccacci, S., Brunetti, M. T., Luciani, S., Ardizzone, F., & Salvati, P. (2020). Geographical landslide early warning systems. *Earth-Science Reviews*, 200, 102986.

LUTENEGGER, A. J. In Situ Testing Methods in Geotechnical Engineering. Boca Raton: CRC Press, 2021.

MICHEL, G, P. MODELAGEM DE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS COM CONSIDERAÇÃO DO EFEITO DA VEGETAÇÃO. 2013. 152 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

O'LOUGHLIN, E. M. Prediction of Surface Saturation Zones in Natural Catchments by Topographic Analysis. *Water Resources Research*, v. 22, n. 5, p. 794–804, 1986.

POZZOBON, M. Análise da suscetibilidade a deslizamentos no município de Blumenau/SC: uma abordagem probabilística através da aplicação da técnica pesos de evidência. 2013. 140 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Florestal, Ciências Agrárias, Ufpr, Curitiba, 2013.

PROJETO GERENCIAMENTO COSTEIRO - GERCO. **Geologia**. Florianópolis: Secretaria de Estado e Desenvolvimento Econômico Sustentável, 2002. Escala 1:2000.

Secretaria de Estado e Desenvolvimento Econômico Sustentável (SDS). MODELO DIGITAL DE TERRENO (MDT) DO ESTADO DE SANTA CATARINA. Florianópolis: INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2002. Escala 1:100000.

SIDLE, R.; OCHIAI, H. Processes, prediction, and land use. **Water resources monograph**. American Geophysical Union, Washington, v. 525, 2006.

ZHANG, Y.; SCHAAP, M. G. Weighted recalibration of the Rosetta pedotransfer model with improved estimates of hydraulic parameter distributions and summary statistics (Rosetta3). *Journal of Hydrology*, v. 547, p. 39–53, 2017.