

AVALIAÇÃO DO PERIGO DE ESCORREGAMENTOS EM ENCOSTAS DE DUAS CIDADES DO NORDESTE BRASILEIRO A PARTIR DA UTILIZAÇÃO DO MODELO SHALSTAB

Naiara de Lima Silva

Universidade Estadual de Santa Cruz, PRODEMA, Ilhéus, BA, Brasil
nls.naiara@gmail.com

Ronaldo Lima Gomes

Universidade Estadual de Santa Cruz, PRODEMA, Ilhéus, BA, Brasil
rlgomes@uesc.br

RESUMO

As cidades de Ilhéus e Itabuna, no sul do estado da Bahia, por seus atributos naturais e a ocupação não planejada de suas encostas, apresentam condições favoráveis à ocorrência de escorregamentos. Este estudo tem o objetivo de diagnosticar a suscetibilidade (perigo) a escorregamentos nessas cidades utilizando o modelo *Shallow Landsliding Stability* (SHALSTAB). Foi realizada uma avaliação físico-ambiental das áreas de estudo; a organização de um inventário de pontos de instabilidade e a distribuição espacial das ocorrências; a implementação do modelo SHALSTAB; e a análise da suscetibilidade e sua relação com eventos de precipitação. A avaliação do perigo de escorregamentos identificou de forma satisfatória as áreas de maior suscetibilidade em Itabuna e Ilhéus. Dentre as classes instáveis, definidas pelo modelo, a incondicionalmente instável insaturado foi a mais significativa, sendo mais expressiva em Ilhéus devido às condições geomorfológicas predominantes. Os resultados gerados pelo modelo foram confirmados pelo inventário de escorregamentos, que estavam localizados nas encostas de maior instabilidade ou proximidades. Segundo o SHALSTAB, chuvas entre 0 e 30 mm/dia são suficientes para desencadear escorregamentos em muitas dessas áreas instáveis. No entanto, a grande maioria dos escorregamentos nessas cidades foi desencadeada por volumes de precipitação maiores que a faixa definida pelo modelo.

Palavras-chave: Movimentos de massa. Suscetibilidade. Modelos matemáticos. Estabilidade de taludes. Sistema de Informação Geográfica.

LANDSLIDE HAZARD ASSESSMENT ON SLOPES IN TWO CITIES IN NORTHEAST BRAZIL USING THE SHALSTAB MODEL

ABSTRACT

The cities of Ilhéus and Itabuna, located in the southern region of Bahia, present favorable conditions for landslides due to their natural attributes and the unplanned occupation of hillslopes. This study aims to assess landslide susceptibility (hazard) in these cities using the Shallow Landsliding Stability Model (SHALSTAB). A physical-environmental assessment of the study areas was conducted, including the compilation of a landslide inventory and its spatial distribution, the implementation of the SHALSTAB model, and the analysis of susceptibility and its relationship with rainfall events. The assessment successfully identified the most susceptible areas in Itabuna and Ilhéus. Among the instability classes defined by the model, the unconditionally unstable unsaturated class was the most significant, being more prominent in Ilhéus due to prevailing geomorphological conditions. The model results were confirmed by the landslide inventory, which showed that landslides were located on or near the most unstable slopes. According to SHALSTAB, rainfall between 0 and 30 mm/day is sufficient to trigger landslides in many of these unstable areas. However, the vast majority of landslides in these cities were triggered by precipitation volumes greater than the range defined by the model.

Keywords: Mass movements. Susceptibility. Mathematical models. Slope stability. Geographical Information System.

INTRODUÇÃO

Os movimentos de massa são transformações na superfície terrestre associadas ao deslocamento de solos, detritos e blocos rochosos. Variam de acordo com o material deslocado, a velocidade, a quantidade de água presente, a forma da ruptura e a deformação resultante (König; Kux; Mendes, 2019). Esses processos geomorfológicos fazem parte da evolução natural do relevo ou podem ser induzidos e potencializados pela ação humana, ocasionando grandes transformações em um curto espaço de tempo, e representando perigo para o homem em regiões de relevo acidentado (Guidicini; Nieble, 1984; Gerente et al., 2023).

Entre os diferentes tipos de movimentos de massa, os escorregamentos aumentaram significativamente nas últimas décadas, impactando quase 5 milhões de pessoas em todo o mundo, levando a prejuízos econômicos, danos a propriedades e perda de vidas humanas (UNDRR, 2020; Melo et al., 2021). Nesse cenário, um dos desafios na avaliação do risco é a previsão da sua distribuição espacial (Montgomery; Dietrich, 1994).

Segundo a terminologia estabelecida pela Organização das Nações Unidas (ONU), por meio da iniciativa *United Nations International Strategy for Disaster Reduction* (UNISDR), o risco de desastre é uma combinação da probabilidade física de ocorrência de um determinado evento (perigo), da vulnerabilidade do meio atingido e dos danos potenciais que ele pode causar (UNDRR, 2016). Nesse sentido, a avaliação do risco de escorregamentos deve combinar esses conceitos, sendo o mapeamento de suscetibilidade e vulnerabilidade utilizado como principal método para o reconhecimento e delimitação de áreas de risco, auxiliando na localização das variáveis responsáveis pela existência desses eventos (Arrogante-Funes et al., 2021; Saha et al., 2021).

Com o desenvolvimento de diferentes ferramentas computacionais e a disponibilidade de dados espaciais e até multitemporais, tornou-se mais dinâmica a produção de mapas de suscetibilidade e vulnerabilidade a escorregamentos (Tsangaratos et al., 2018). Nas últimas duas décadas, quase todos os métodos utilizados para avaliação do risco foram baseados em conceitos de Sistema de Informação Geográfica (SIG) (Abbaszadeh Shahri et al., 2019). Essa ferramenta tornou-se fundamental para o melhor planejamento pela sua capacidade de gerar com rapidez e precisão a localização de áreas suscetíveis, muitas vezes de difícil acesso para levantamentos de campo (Listo; Santos, 2023). No Brasil, em diversos locais, esses processos geomorfológicos são recorrentemente investigados com o uso dessa ferramenta (Santos; Listo, 2019; König; Kux; Mendes, 2019; Ávila et al., 2020; Bonini et al., 2020; Melo et al., 2021; Cabral et al., 2022; Pinho; Augusto Filho, 2022; Gerente et al., 2023; Listo; Santos, 2023).

Técnicas com abordagens estatísticas, probabilísticas, geotécnicas, determinísticas e heurísticas baseiam-se principalmente em modelos matemáticos e expressões numéricas das relações entre fatores condicionantes e ocorrência de escorregamentos (Abbaszadeh Shahri et al., 2019). Na década de 1990 e início da década de 2000, importantes modelos foram desenvolvidos como o SHALSTAB (*Shallow Landsliding Stability Model*) de Montgomery e Dietrich (1994), SINMAP (*Stability INdex MAPping*) por Pack, Tarboton e Goodwin (1998) e TRIGRS (*Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope Stability*) por Baum; Savage; Godt (2002). Esses modelos permitem a parametrização de variáveis para caracterizar processos de estabilidade de encostas – ou seja, dados de precipitações ou cenários de solo – por meio de calibração e validação simples (Gorsevski, 2023). Apresentam diferentes níveis de complexidade e, atualmente, oferecem a maior precisão na previsão entre todos os métodos existentes baseando-se no Fator de Segurança (FS), o que reduz a subjetividade dos resultados (Merghadi et al., 2020; Melo et al., 2021).

Para a escolha do modelo de previsão mais adequado, devem ser considerados parâmetros técnico-científicos importantes, incluindo condições geotécnicas e hidrológicas apropriadas, dados de precipitação e métodos de validação (Pinho; Augusto Filho, 2022). A maioria dos estudos é aplicada em escala de encosta ou de bacia hidrográfica, contextos nos quais é necessário o maior controle possível sobre qualidade dos dados (Ávila et al., 2020; Marin; Garcia; Aristizábal, 2020; Lin et al., 2021; Shou; Chen, 2021; Cabral et al., 2022).

Nesse contexto, as cidades de Ilhéus e Itabuna, localizadas no sul do estado da Bahia, por seus atributos naturais e a ocupação desordenada de suas encostas, apresentam condições favoráveis à ocorrência de escorregamentos, principalmente em períodos chuvosos, condição já comprovada anteriormente por Gomes et al. (2008), Franco, Menezes e Gomes (2009), Costa (2015), CPRM (2013; 2019) e Silva e Gomes (2025). No entanto, como os sítios urbanos passam por transformações e modificações significativas no uso e ocupação do solo, é importante a integração dos produtos já existentes com novos estudos e o desenvolvimento de abordagens ainda não realizadas. Neste sentido, este trabalho tem o objetivo de

diagnosticar a suscetibilidade (perigo) a escorregamentos nessas cidades, utilizando o modelo *Shallow Landsliding Stability - SHALSTAB*.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

Considerados polos de desenvolvimento regional, os municípios de Itabuna e Ilhéus localizam-se na região sul do estado da Bahia distantes aproximadamente 450 km da capital, Salvador (Figura 1). O município de Itabuna possui uma área territorial de 401,03 km² e 186.708 habitantes, dos quais cerca de 85% residem na zona urbana, distribuída em uma área de 27,16 km². Já Ilhéus tem uma população de 178.649 pessoas, ocupando uma área de 1.588,56 km², sendo a área urbanizada de 35,33 km², onde habitam 98% da população (IBGE, 2023, 2019).

Segundo a classificação de Köppen, empregada por Alvares *et al.* (2013) para o Brasil, o clima nestes dois municípios é do tipo Af (clima tropical úmido ou superúmido), com índices pluviométricos anuais superiores a 1500 mm, caracterizado por chuvas bem distribuídas ao longo do ano, sem uma estação seca bem definida, com precipitações superiores a 60 mm no mês menos chuvoso. As temperaturas médias anuais variam de 22 a 26°C, com temperatura média do mês mais frio superior a 18°C.

A vegetação predominante da área é a Mata Atlântica, floresta ombrófila condicionada pelas características climáticas e que se mostra bastante devastada. De modo restrito, nos cordões litorâneos de Ilhéus, observa-se uma vegetação arbustiva e arbórea, e nas desembocaduras dos rios, a presença de vegetação de mangue (Arcanjo, 1993).

Com relação à geologia, Ilhéus e Itabuna apresentam dois compartimentos distintos, sendo o primeiro composto por rochas do substrato cristalino pré-cambriano e o segundo, por coberturas sedimentares que recobrem esse substrato. Os relevos são formados por planícies, com menor variação de altitude e declividade, e áreas de colinas e morros, com topos amplos e arredondados. Em ambas as cidades, as amplitudes altimétricas podem chegar a 100m. Em contrapartida, Ilhéus possui declividades mais acentuadas e maior ocupação antrópica em suas encostas, justificando a maior ocorrência de escorregamentos na mesma.

Figura 1 - Localização das áreas em estudo que englobam as sedes municipais de Ilhéus e Itabuna (BA)



Elaboração: Silva; Gomes, 2024.

Diagnóstico físico-ambiental e elaboração da cartografia temática

O método inicia-se com a organização da base cartográfica das áreas estudadas. Para tanto, foram utilizadas as bases digitais da SICAR/CONDER – Companhia de Desenvolvimento Urbano do Estado da Bahia (CONDER, 2002), em escala 1:2.000, que recobrem a zona urbana dos municípios de Ilhéus e Itabuna. Os dados altimétricos dessa base, em formato *shapefile*, apresentam a altimetria em curvas de

nível equidistantes de 1m. Com a utilização do software livre QGIS (versão 3.34.7), os arquivos vetoriais de curvas de nível das duas cidades foram úteis para a confecção de arquivos *raster* do Modelo Digital do Terreno (MDT), com resolução de *pixel* de 1 metro, e extensão espacial de 126,3 km² para Ilhéus e 69,2 km² para Itabuna.

A partir da manipulação do MDT, foram extraídos os dados de hipsometria (altitude) e de declividade, a fim de caracterizar as feições e a dinâmica do meio físico na área. Aliam-se a esses dados de relevo, as informações vetorizadas (*shapefile*) das classes de substrato rochoso, obtidas do mapeamento geológico realizado por Arcanjo (1993).

Inventário de escorregamentos e espacialização das ocorrências

Com a finalidade de obtenção de dados sobre ocorrências pretéritas de escorregamentos e identificar pontos potenciais em Ilhéus e Itabuna, foi elaborado um inventário de registros de ocorrências no período de fevereiro de 2017 a maio de 2023, para Ilhéus, e de julho de 2022 a abril 2023, para Itabuna, obtidos junto às Defesas Civis dos respectivos municípios. O menor período considerado para Itabuna, deve-se à disponibilidade de dados apenas após o início da gestão municipal em vigor no período de 2021 a 2024. Os dados levantados foram organizados em planilhas eletrônicas, seguindo uma estrutura que considerou a data do evento e sua localização.

No caso de Ilhéus, além da data do evento, os dados de localização correspondem aos endereços dos municípios que realizaram os chamados telefônicos à Defesa Civil. Parte-se da premissa de que esses endereços cadastrados não coincidem necessariamente com o local do escorregamento, podendo referir-se a locais vizinhos. Tais registros são úteis, portanto, para identificar a encosta ou face do morro onde ocorreu o evento, ainda que não indique o seu local exato. Para Itabuna, por sua vez, algumas das notificações apresentaram imagens do local do acidente com as coordenadas geográficas, conferindo maior precisão à localização dos eventos de escorregamento.

Foi realizada uma triagem das ocorrências a fim de excluir os registros repetidos, com endereço incorreto ou relacionados a períodos sem chuvas registradas pelas estações pluviométricas locais, uma vez que podem estar associados a outras causas. Após a organização e consolidação dos dados cadastrais, foi realizada a geocodificação, processo de conversão de endereços em coordenadas geográficas, utilizando a ferramenta complementar de geocodificação *Awesome Table* no Planilhas Google. Na sequência, as coordenadas geográficas foram transformadas em arquivos com extensão .csv e adicionadas ao QGIS, onde foram convertidas em arquivos cartográficos de pontos (*shapefiles*).

Para melhor avaliar a espacialização das ocorrências de escorregamentos nas áreas estudadas, foi empregado o estimador de densidade *kernel*, que permite a identificação visual das chamadas “áreas quentes” (*hotspots*), ou seja, onde há uma maior concentração de eventos. Esse tipo de análise é frequentemente usado em software SIG para calcular a densidade de elementos em seus arredores imediatos, e os resultados podem refletir o grau de agregação dos dados de entrada em termos de arranjo espacial (Dong *et al.*, 2022; Xiao *et al.*, 2023). Ademais, esse método concentra-se exclusivamente no próprio evento para analisar os padrões de distribuição, não exigindo hipóteses *a priori*. A função de análise de densidade do kernel é expressa na Equação 1:

$$f_n(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n k\left(\frac{x-x_i}{h}\right) \quad (1)$$

Em que *k* é a função densidade de kernel; *n* é o número de pontos existentes; *x - x_i* é a distância entre o ponto da estimativa de densidade *x* e *x_i*; *h* representa o raio de busca. Para aplicação do método, utilizou-se a ferramenta “Mapa de calor (Estimativa de densidade Kernel)” do QGIS, considerando o tamanho do *pixel* de análise igual a 1 m e o raio de busca ideal como 300 m.

Levantamento de dados geotécnicos e aplicação do modelo SHALSTAB

Para o mapeamento do perigo a escorregamentos em encostas de Ilhéus e Itabuna, utilizou-se o modelo *Shallow Landsliding Stability Model* – SHALSTAB, desenvolvido a partir de proposições de Montgomery e Dietrich (1994), Montgomery, Sullivan e Greenberg (1998) e Dietrich *et al.* (1998). Trata-se de um modelo matemático determinístico, aplicado em ambiente computacional e georreferenciado, que representa

espacialmente a suscetibilidade a escorregamentos rasos rotacionais (Gerente *et al.*, 2023). É geralmente recomendado para taludes em pequenas bacias hidrográficas (Montgomery; Dietrich, 1994; Dietrich; Bellugi; Asua, 2001).

A fórmula matemática do SHALSTAB combina o modelo de estabilidade de taludes, baseado na equação de talude infinito (baseado na lei de Mohr-Coulomb), com o modelo hidrológico de estado estacionário, desenvolvido por O'Loughlin (1986), que utiliza índices de chuva constantes para prever zonas de saturação no terreno (König; Kux; Mendes, 2019; Bonini *et al.*, 2020; Shou; Chen, 2021; Cabral *et al.*, 2022). Esses modelos combinados fornecem uma relação entre a precipitação e a transmissividade do solo que pode levar à ruptura do talude (Equação 2).

$$\text{Log} \left(\frac{q}{T} \right) = \frac{\text{sen} \theta}{\frac{a}{b}} \left[\left(\frac{c'}{\rho_w \cdot g \cdot z \cdot \cos^2 \theta \cdot \tan \phi} \right) + \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} \right) \cdot \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi} \right) \right] \quad (2)$$

Em que: "q" a precipitação efetiva (mm); "T" a transmissividade do solo (m²/dia); "a" a área de contribuição (m²); "b" o comprimento do contorno (m); "c" a coesão efetiva do solo (N/m²); "θ" a inclinação da encosta (°); "ρ_w" a densidade da água (kg/m³); "ρ_s" densidade do solo (kg/m³); "g" a gravidade (m/s²); "z" a espessura do solo (m) e "φ" o ângulo de atrito interno (°).

Montgomery e Dietrich (1994) propõem um sistema de classificação da área analisada, em termos da razão log (q/T), que se traduz em sete categorias de estabilidade, variando de estável a instabilidade crônica, conforme mostrado no Quadro 1.

Quadro 1 - Classes de estabilidade de encostas de acordo com o modelo SHALSTAB

Classes	Log q/T	Características
1 Incondicionalmente Instável Saturado	- 10 a - 9,9 Incondicionalmente Instável	A ruptura da encosta pode ocorrer mesmo em condições não saturadas (lençol freático abaixo da superfície de ruptura, (h/z = 0). Assim, a relação entre os parâmetros do solo não supera os efeitos de instabilidade da encosta.
2 Incondicionalmente Instável Insaturado	- 9,9 a - 3,1 (< - 3,1)	As classes intermediárias são estabelecidas pela razão q/T (chuva crítica necessária para ocorrer a ruptura dividida pela transmissividade do solo). Quanto mais próximo o log (q/T) estiver de -9,9, mais provável será que razões h/z baixas (como quando o lençol freático se eleva acima da superfície da ruptura) provocarão escorregamento.
3 Instável Saturado	-3,1 a - 2,8	
4 Instável Insaturado	- 2,8 a - 2,5	
5 Estável Insaturado	- 2,5 a - 2,2	
6 Incondicionalmente Estável Insaturado	-2,2 a 9,9 (> - 2,2)	
7 Incondicionalmente Estável Saturado	9,9 a 10 Estável	A encosta é estável mesmo quando o solo está completamente saturado (h/z = 1), ou seja, mesmo com o solo saturado, a relação entre os parâmetros de resistência do solo superam os efeitos de instabilidade da encosta.

Fontes: Montgomery; Dietrich (1994); Pinho; Augusto Filho (2022) e Prieto *et al.* (2017). Adaptação: Silva; Gomes, 2024.

Segundo os dados do Quadro 1, valores mais baixos de log q/T indicam maior tendência à instabilidade, enquanto valores mais altos sugerem maior chance de estabilidade (Cabral *et al.*, 2022). As classes "Incondicionalmente Instável Insaturado" e "Incondicionalmente Estável Saturado" representam as condições extremas: na primeira, apesar da ausência de água (solo seco), os parâmetros físicos do solo não resistem à declividade acentuada, ocasionando escorregamentos; na segunda, mesmo com solo saturado, as propriedades físicas superam a declividade, impedindo os escorregamentos (Michel; Kobiyama; Goerl, 2014; Pinho; Augusto Filho, 2022).

O modelo SHALSTAB vem sendo amplamente utilizado em aplicações no Brasil e no exterior (König; Kux; Mendes, 2019; Bonini *et al.*, 2020; Melo *et al.*, 2021; Shou; Chen, 2021; Cabral *et al.*, 2022; Pinho; Augusto Filho, 2022; Gerente *et al.*, 2023; Hong *et al.*, 2023). Seu uso frequente está associado à eficiência devido

ao seu aspecto determinístico, ao fácil acesso, à disponibilidade de software livre e à pequena quantidade de dados que necessita (Melo *et al.*, 2021). Além disso, apresenta a possibilidade de estimar a suscetibilidade de uma encosta a escorregamentos a partir de valores de chuva crítica, capacidade interessante pensando do ponto de vista de inclusão desse modelo em abordagens operacionais de monitoramento de risco (Gerente *et al.*, 2023). O modelo não considera as alterações antrópicas para identificar as áreas suscetíveis a escorregamentos (König; Kux; Mendes, 2019).

Os dados de entrada do SHALSTAB incluem os parâmetros topográficos – “a” (área de contribuição) “b” (comprimento do contorno (m)) e “θ” (inclinação da encosta), obtidos por meio do Modelo Digital do Terreno (MDT) – e os parâmetros físicos do solo: densidade, coesão, ângulo de atrito, condutividade hidráulica e espessura da camada. Para os parâmetros físicos dos solos, este trabalho utilizou informações disponíveis na literatura empregando o critério de similaridade de geologia e cobertura de solos entre a área de estudo e as áreas trabalhadas pelos autores consultados. Também foram utilizados dados de trabalhos de campo e ensaios geotécnicos realizados em amostras de solo coletadas em obra rodoviária entre as cidades de Ilhéus e Itabuna (SEINFRA, 2021).

Franco (2010) e Franco *et al.* (2012) elaboraram mapas de solo a partir da análise de perfis de alteração na bacia hidrográfica do Rio Almada, localizada ao norte das áreas em estudo. Esses trabalhos forneceram classificações pedogenéticas e geotécnicas dos solos, bem como parâmetros como porosidade e textura. Maia (2018), ao analisar a estabilidade de uma encosta no município de Salvador (BA), realizou uma caracterização geotécnica de solo de alteração em granulitos – rochas metamórficas que se estendem da região de Itabuna-Ilhéus até Curaçá, ao norte do estado (Barbosa; Sabaté, 2002). O autor determinou a condutividade hidráulica *in situ*, e os resultados demonstram comportamento de permeabilidade típicos de solos silte-argilosos a siltosos, corroborando os dados obtidos ao longo do trecho da rodovia e nos trabalhos de Franco (2010) e Franco *et al.* (2012).

No estudo geológico e geotécnico das obras de duplicação da BR-415/BA (SEINFRA, 2021), no segmento entre Itabuna e Ilhéus, foram apresentadas as análises de estabilidade dos taludes críticos da rodovia, baseadas em dados de sondagens e ensaios laboratoriais em amostras de solos. Esse estudo contribuiu para a definição do perfil típico de alteração das áreas estudadas, bem como de seus parâmetros de resistência como a coesão, ângulo de atrito interno e massa específica aparente. Cabe destacar que a localização do trecho das obras não intercepta as áreas urbanas de Ilhéus e Itabuna, mas devido à falta de informações sobre os parâmetros físicos do solo da região e a homogeneidade da geologia e de solos, esses dados foram considerados representativos das encostas destas duas cidades.

A Tabela 1 apresenta a base de dados utilizada na caracterização das áreas de estudo e os parâmetros utilizados no modelo SHALSTAB, com vistas à avaliação da estabilidade de encostas nas áreas urbanas de Ilhéus e Itabuna.

Tabela 1 - Base de dados para estudo de estabilidade de encostas nas áreas urbanas de Ilhéus e Itabuna

Parâmetros	Ilhéus	Itabuna	Fonte
Modelo Digital do Terreno	MDT matricial com resolução de pixel de 1x1m.	MDT matricial com resolução de pixel de 1x1m.	SICAR/CONDER (2002)
Substrato rochoso	Complexos Ilhéus e Rio Japú. Biotita granito-gnaisses granulitizados.	Rochas ígneas plutônicas básicas e metadioritos granulitizados do Complexo São José.	Arcanjo (1993).
Classes de solo	Argissolos amarelo	Argissolos vermelho amarelo	Franco (2010) Franco <i>et al.</i> (2012).
Classe SUCS	MH e CH	MH e CH	MH e CL
Porosidade dos solos (%)	46 - 55	37 - 55	46 - 55
Textura	média a argilosa	média a argilosa	média a argilosa

Ângulo de atrito (°)	14,5 – 33,2	SEINFRA, 2021
Coesão (N/m ²)	3.000 – 35.000	
Densidade (kg/m ³)	1.559,6 – 2.116,2	
Espessura (m)	3,0 – 6,0	
Condutividade hidráulica (m/s)	2,2 × 10 ⁻⁸ - 2,7 × 10 ⁻⁷	Maia (2018)

Organização: Silva; Gomes, 2024

De posse dos dados de entrada, o SHALSTAB foi operado usando o complemento *r.shalstab* disponível no software livre GRASS GIS (versão 8.3.2). O modelo define as camadas de suscetibilidade a escorregamentos com valores de 1 (incondicionalmente instável) a 7 (estável), sendo que as camadas 2 a 6 correspondem a valores de precipitação diária para os quais pode ocorrer rupturas de taludes. Tais valores de chuva crítica são 0-30 mm/dia, 31-100 mm/dia, 101-150 mm/dia, 151-200 mm/dia, 201-999 mm/dia, para as classes 2 a 6, respectivamente. Para a classe 1 (incondicionalmente instável saturado), a ruptura pode ocorrer mesmo em condições não saturadas, uma vez que, a alta declividade condiciona esta suscetibilidade. Já a classe 7 (incondicionalmente estável saturado), a encosta é estável mesmo quando o solo se encontra completamente saturado.

Nas simulações, foram considerados vários cenários, utilizando diferentes valores para os parâmetros geotécnicos, dentro dos intervalos apresentados na Tabela 1. A análise foi baseada em parâmetros constantes para toda a extensão espacial das áreas de estudo. Em seguida, utilizando o inventário de escorregamentos como referência, foi realizada uma análise de coincidência entre as áreas consideradas instáveis pelo SHALSTAB e a localização das ocorrências registradas. Quanto maior o número de coincidências, melhor o desempenho da calibração. Segundo Melo e Kobiyama (2018), a calibração é essencial, pois cada local possui suas particularidades pluviométricas, geomorfológicas e geotécnicas, que interagem de forma específica. Ademais, ela é especialmente necessária quando não há obtenção direta de amostras para definição dos parâmetros geotécnicos de entrada no modelo.

Não foi possível aplicar métodos de validação para mensurar quantitativamente o desempenho do modelo, uma vez que muitos pontos do inventário não correspondem exatamente ao local das cicatrizes, isto é, as ocorrências não puderam ser verificadas dentro das células classificadas como instáveis, mas sim nas suas proximidades. Dessa forma, a avaliação dos resultados foi conduzida de modo qualitativo.

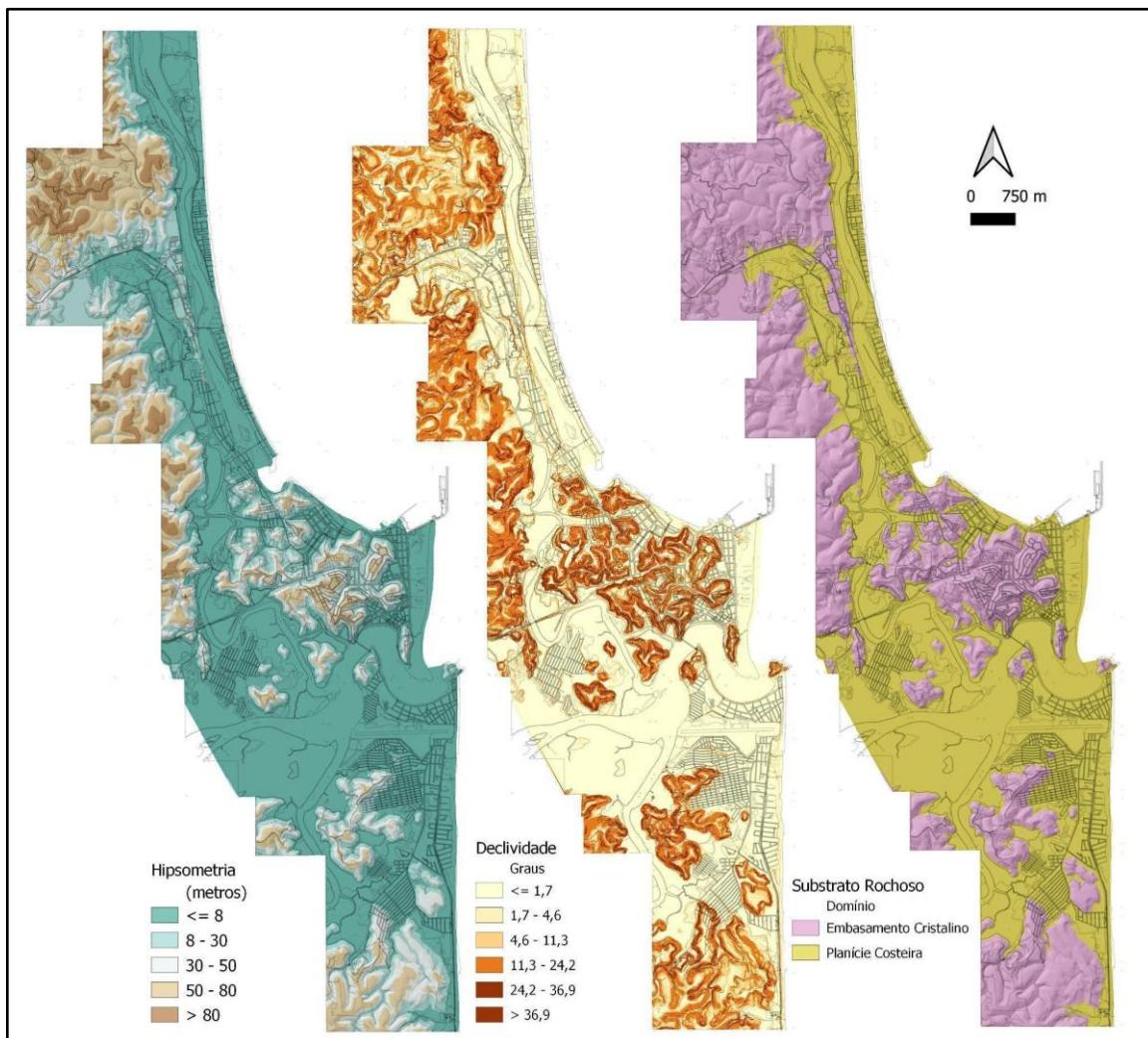
RESULTADOS E DISCUSSÃO

Aspectos das formas de relevo, substrato rochoso e materiais inconsolidados das áreas em estudo

Com relação às características hipsométricas, foram definidas classes em virtude das variações de cota no terreno nas duas cidades estudadas. Em Ilhéus, as altitudes entre 0 e 8 metros associam-se às planícies costeiras situadas na faixa litorânea e estuarina, bem como às zonas baixas que margeiam os rios Cachoeira, Fundão, Almada e Santana, representando, de modo geral, os limites inferiores das encostas. A classe de 8 a 30 metros ocorre no fundo dos vales da região central da cidade. Já as cotas entre 30 e 50 metros representam os desníveis entre as porções inferiores e superiores das vertentes. Os topões de morros apresentam altitudes entre 50 e 80 metros e entre 80 e 106 metros (Figura 2).

Em Itabuna, as menores altitudes estão na classe inferior a 50 metros, associada às cotas do rio Cachoeira a jusante do barramento, no centro da cidade, além da porção leste da área urbana. A classe de 50 a 70 metros corresponde às cotas da planície de inundação do mesmo rio e das áreas mais baixas ocupadas pelo sítio urbano. Já as altitudes entre 70 e 90 metros ocorrem em rampas de relevo e fundos de vale com baixa ocupação. As classes de 90 a 100 metros e de 110 a 130 metros representam os desníveis entre as bases e os topões das vertentes, especialmente na porção oeste e sul da cidade. Nas pequenas colinas, a classe de 90 a 100 metros representa o desnível total da encosta, enquanto as altitudes entre 100 e 130 metros correspondem às cristas. No topo do relevo, ocorrem ainda as classes hipsométricas de 130 a 150 metros e de 150 a 162 metros, esta última restrita à porção oeste da área (Figura 3).

Figura 2 - Classes de hipsometria, declividade e domínio do substrato rochoso em Ilhéus



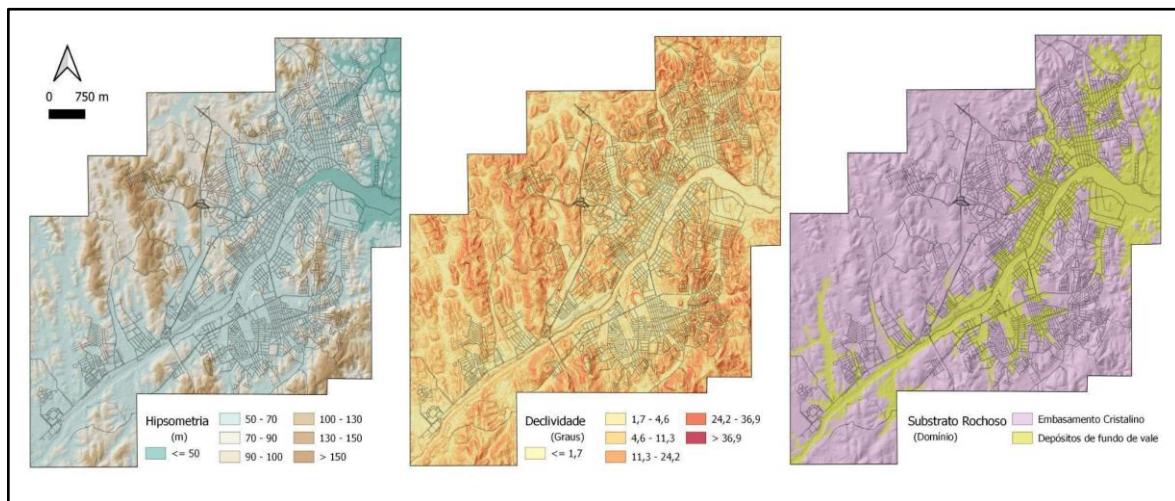
Fontes: Arcanjo, 1993; CONDER, 2002. Elaboração: Silva; Gomes, 2024.

Com relação às declividades, foram estabelecidas seis classes ($0\text{--}1,7^\circ$, $1,7\text{--}4,6^\circ$, $4,6\text{--}11,3^\circ$, $11,3\text{--}24,2^\circ$, $24,2\text{--}36,9^\circ$ e $> 36,9^\circ$), conforme estabelecido pela Embrapa (2018), e considerando-se o disposto na Lei Federal nº 6.766/79 (BRASIL, 2006), que determina que terrenos com declividade igual ou superior a 30% ($16,7^\circ$), salvo em casos excepcionais autorizados pelas autoridades competentes, não devem ser parcelados para fins urbanos.

As declividades em Ilhéus indicam um relevo bastante movimentado, com as duas primeiras classes — plano ($0\text{--}1,7^\circ$) e suavemente ondulado ($1,7\text{--}4,6^\circ$) — associadas aos topo de morros, fundos de vale e à baixada litorânea, incluindo áreas de manguezais. Já as classes $4,6\text{--}11,3^\circ$ (ondulada), $11,3\text{--}24,2^\circ$ (fortemente ondulada) e $24,2\text{--}36,9^\circ$ (montanhosa) ocorrem entre a parte superior das encostas e o trecho de meia encosta. As maiores declividades ($> 36,9^\circ$) concentram-se, principalmente, na base dos taludes. A análise da Figura 2 permite observar diversas áreas com declividades superiores a $16,7^\circ$ (30%), com estruturas e domicílios localizados nas vertentes, o que contraria a legislação vigente sobre parcelamento do solo urbano (Lei Federal nº 6.766/79).

Já o sítio urbano de Itabuna apresenta, predominantemente, classes de declividade entre $0\text{--}1,7^\circ$ e $1,7\text{--}4,6^\circ$, correspondentes a áreas planas ou suavemente onduladas, associadas à planície de inundação do rio Cachoeira e aos fundos de vale. As declividades de $4,6\text{--}11,3^\circ$ ocorrem no sopé dos morros, enquanto as de $11,3\text{--}24,2^\circ$ e $24,2\text{--}36,9^\circ$ aparecem entre a parte superior e a faixa de meia encosta, inclusive nos barrancos das margens do rio Cachoeira. As declividades superiores a $36,9^\circ$ são inexpressivas no município. A Figura 3 mostra uma distribuição menos significativa de áreas urbanas com declividades acima de $16,7^\circ$.

Figura 3 - Classes de hipsometria, declividade e domínio do substrato rochoso em Itabuna



Fontes: Arcanjo, 1993; CONDER, 2002. Elaboração: Silva; Gomes, 2024.

No contexto geológico, a área urbana de Ilhéus apresenta litologias associadas aos domínios dos complexos metamórficos Ibicaraí-Buerarema e Ilhéus, conforme definido por Arcanjo (1993). Esses complexos são constituídos, predominantemente, por rochas arqueanas gnáissicas granulitizadas, com composição tonalítica a dacítica, podendo conter corpos de rochas metabásicas. Em Itabuna, o embasamento cristalino é associado ao domínio do Complexo São José, representado por rochas ígneas granulitizadas caracterizadas como metatonalitos, metagabronoritos, metadioritos e metabasaltos. Essas rochas apresentam-se em bandas alternadas e estruturadas em relevo, com cristas e vales orientados no sentido norte-sul, como pode ser observado na Figura 3, que retrata as formas de relevo da área.

Quanto às coberturas sedimentares, no caso de Ilhéus, os depósitos quaternários consistem em materiais inconsolidados de diversas origens, localizados na planície costeira, resultantes de variações do nível do mar (Gomes et al., 2008). Destacam-se os sedimentos finos argilo-siltosos das planícies flúvio-lagunares e de manguezais, bem como depósitos arenosos associados às praias atuais e a terraços marinhos holocênicos e pleistocênicos. Em Itabuna, os depósitos sedimentares são predominantemente arenosos e associados às coberturas aluvionares, atuais e antigas, da planície de inundação do rio Cachoeira, podendo atingir espessuras de até 3 metros (Gomes et al., 2008; Hora; Gomes, 2009). Devido à baixa declividade dessas áreas, sua importância quanto a eventos de instabilidade de encostas é irrelevante.

Os materiais inconsolidados caracterizam-se como produtos de alteração residual das rochas do embasamento cristalino. O perfil de alteração expressa o grau de intemperismo da rocha matriz, com graduação desde o topo — onde se encontra o solo residual maduro — passando pelo solo residual jovem, saprólico e, finalmente, a rocha. Essa transição reflete distintos graus de alteração, fraturamento e coerência, variando de rocha extremamente alterada até rocha sã, com progressiva melhoria das características mecânicas com o aumento da profundidade. De acordo com a SEINFRA (2021) e observações de campo, a profundidade média da superfície do topo rochoso (impenetrável à percussão) varia entre 3,5 m e 16 m.

Perfis típicos de alteração indicam solos predominantemente silto-argilosos e/ou silto-arenosos, com espessuras médias entre 3 e 6 metros. Em alguns trechos, observaram-se matacões imersos no solo de alteração. De forma geral, os solos residuais presentes nas áreas estudadas demonstram boas características geotécnicas. Os resultados dos ensaios de cisalhamento direto realizados por SEINFRA (2021) indicaram pesos específicos naturais entre 15,3 e 20,8 kN/m³, coesão efetiva variando entre 3 e 35 kPa e ângulo de atrito efetivo entre 14,5° e 33,2°.

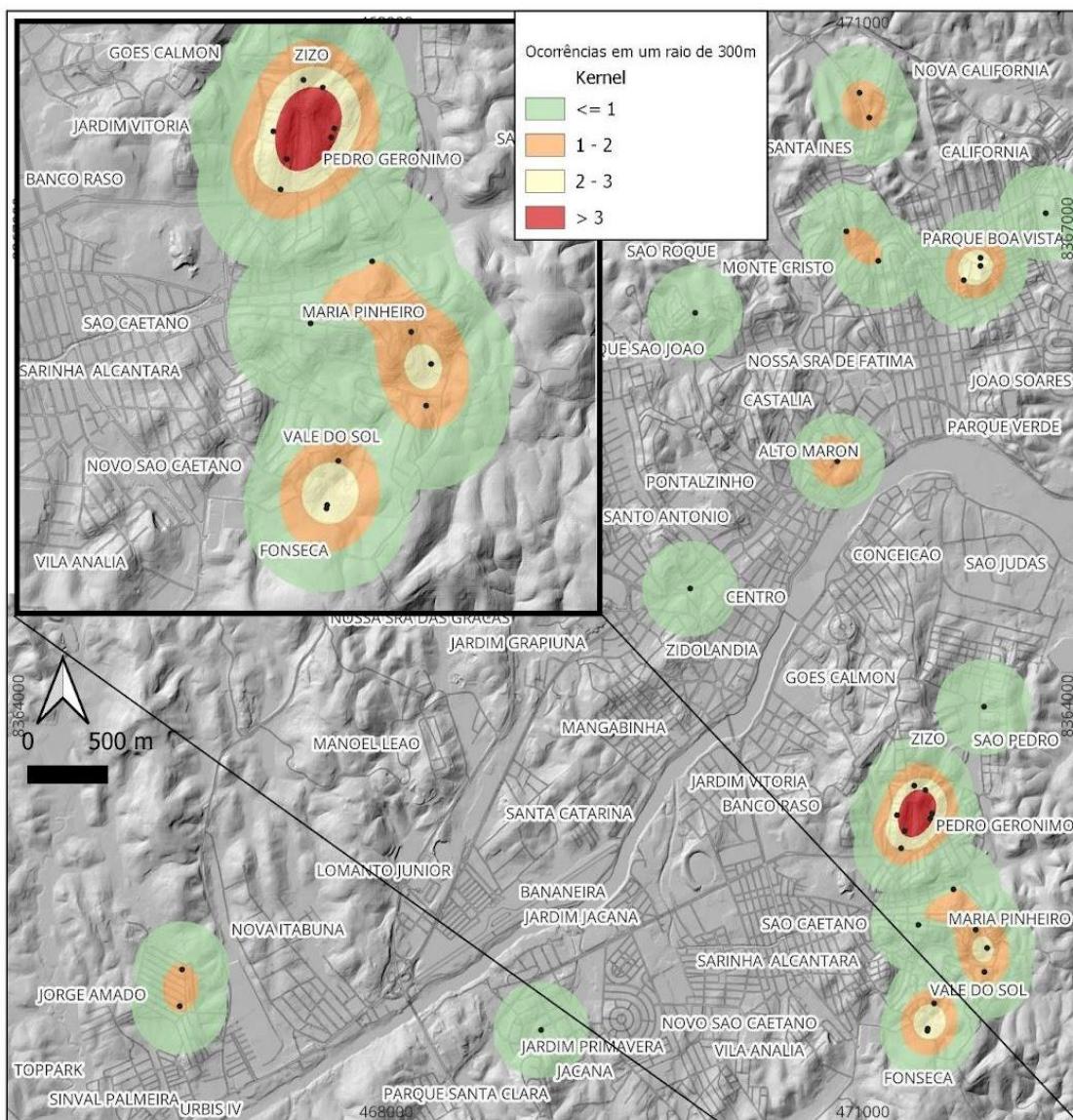
Inventário e espacialização dos escorregamentos

No inventário de escorregamentos, foram mapeadas 166 ocorrências em Ilhéus e 31 em Itabuna, concentradas em áreas de encosta com processo de urbanização espontâneo sobre substrato cristalino e com declividades acentuadas. Conforme mostrado na Figura 4, em Itabuna, os bairros Pedro Gerônimo, Zizo, Maria Pinheiro e Vale do Sol, ao sudeste da cidade, além dos bairros Alto Maron e Califórnia, ao norte, apresentam os maiores valores de densidade de kernel, indicando maior concentração de

escorregamentos. Juntos, esses bairros correspondem a mais de 60% das ocorrências. Também foram identificados pontos isolados em áreas com forte declive. Os locais mapeados apresentam associação com relevo fortemente ondulado ($11,3^{\circ}$ – $24,2^{\circ}$) a montanhoso ($> 36,9^{\circ}$).

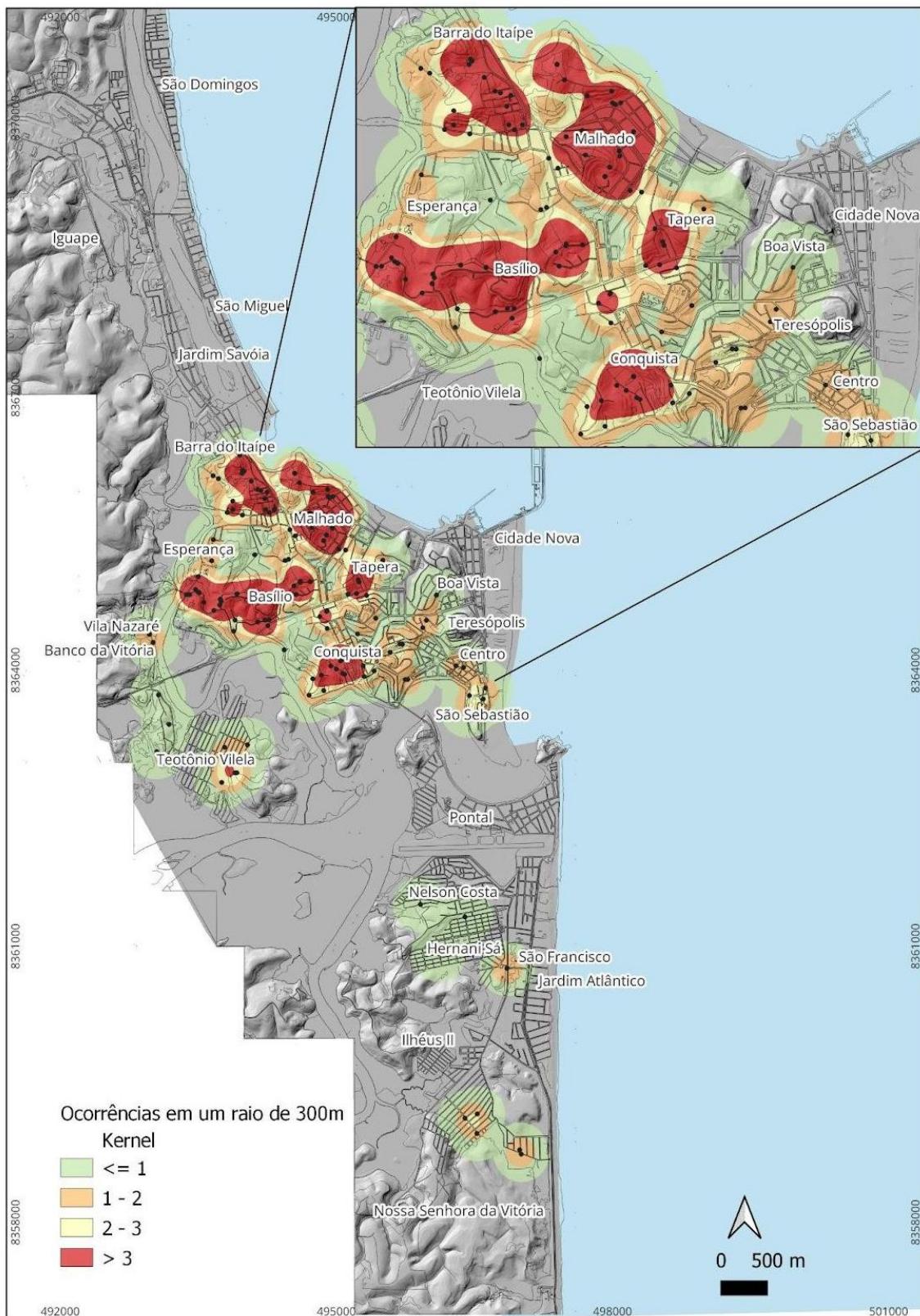
Em Ilhéus, os escorregamentos também se concentram em áreas de relevo fortemente ondulado a montanhoso, principalmente na região central da cidade (Figura 5). Destacam-se hotspots nos bairros Malhado, Basílio, Esperança, Conquista, Barra do Itaípe e Tapera, que juntos respondem por mais de 80% das notificações. Tais áreas já haviam sido identificadas por Gomes et al. (2008) e Franco et al. (2009) como zonas com indicadores e condicionantes de risco. Há também aglomerados de ocorrências nas zonas elevadas do sul da cidade, embora com menor densidade de escorregamentos.

Figura 4 - Mapa de densidade de kernel das ocorrências de escorregamentos em Itabuna (BA)



Elaboração: Silva; Gomes, 2024.

Figura 5 - Mapa de densidade de kernel das ocorrências de escorregamentos em Ilhéus (BA)



Elaboração: Silva; Gomes, 2024.

Os resultados encontrados demonstram que há um agrupamento espacial e uma variabilidade significativa na distribuição dos escorregamentos nas áreas de estudo. Ademais, o número de pontos e o grau de

agregação dos dados mostrou-se significativamente maior em Ilhéus do que em Itabuna, refletindo condições mais propícias à ocorrência de processos geomorfológicos. Li et al. (2024), ao analisarem as características da distribuição espacial de escorregamentos na Península de Liaodong, China, também constataram forte agregação dos eventos, condicionada predominantemente pelas características geomorfológicas e pelo uso e ocupação do solo.

Os cenários modelados para a avaliação da susceptibilidade

Para as simulações com o modelo SHALSTAB, foram realizados testes com diferentes cenários para os parâmetros geotécnicos, e os mapas de suscetibilidade gerados foram comparados com os inventários de escorregamentos.

O cenário que melhor representou a instabilidade de encostas nas duas áreas estudadas foi aquele que utilizou os valores médios para os parâmetros de entrada, sendo: ângulo de atrito de 23,1°; coesão dos solos de 13.210 N/m²; densidade do solo de 1.819 kg/m³; espessura do solo de 4,5 m; e condutividade hidráulica de $5,26 \times 10^{-4}$ m/h. Os mapas de suscetibilidade gerados pelo modelo foram classificados em sete categorias, conforme apresentado na Tabela 2, a qual discrimina as áreas correspondentes a cada classe nas duas cidades analisadas.

Tabela 2 - Classes de estabilidade das encostas de Itabuna e Ilhéus de acordo com o modelo SHALSTAB

Classe	Característica	Itabuna		Ilhéus	
		Área (km ²)	Área (ha)	Área (km ²)	Área (ha)
1	Incondicionalmente Instável Saturado	0,51	51	1,23	123
2	Incondicionalmente Instável Insaturado	1,76	176	2,51	251
3	Instável Saturado	0,57	57	0,57	57
4	Instável Insaturado	0,52	52	0,45	45
5	Estável Insaturado	0,81	81	0,67	67
6	Incondicionalmente Estável Insaturado	0,51	51	0,38	38
7	Incondicionalmente Estável Saturado	38,15	3815	27,01	2701

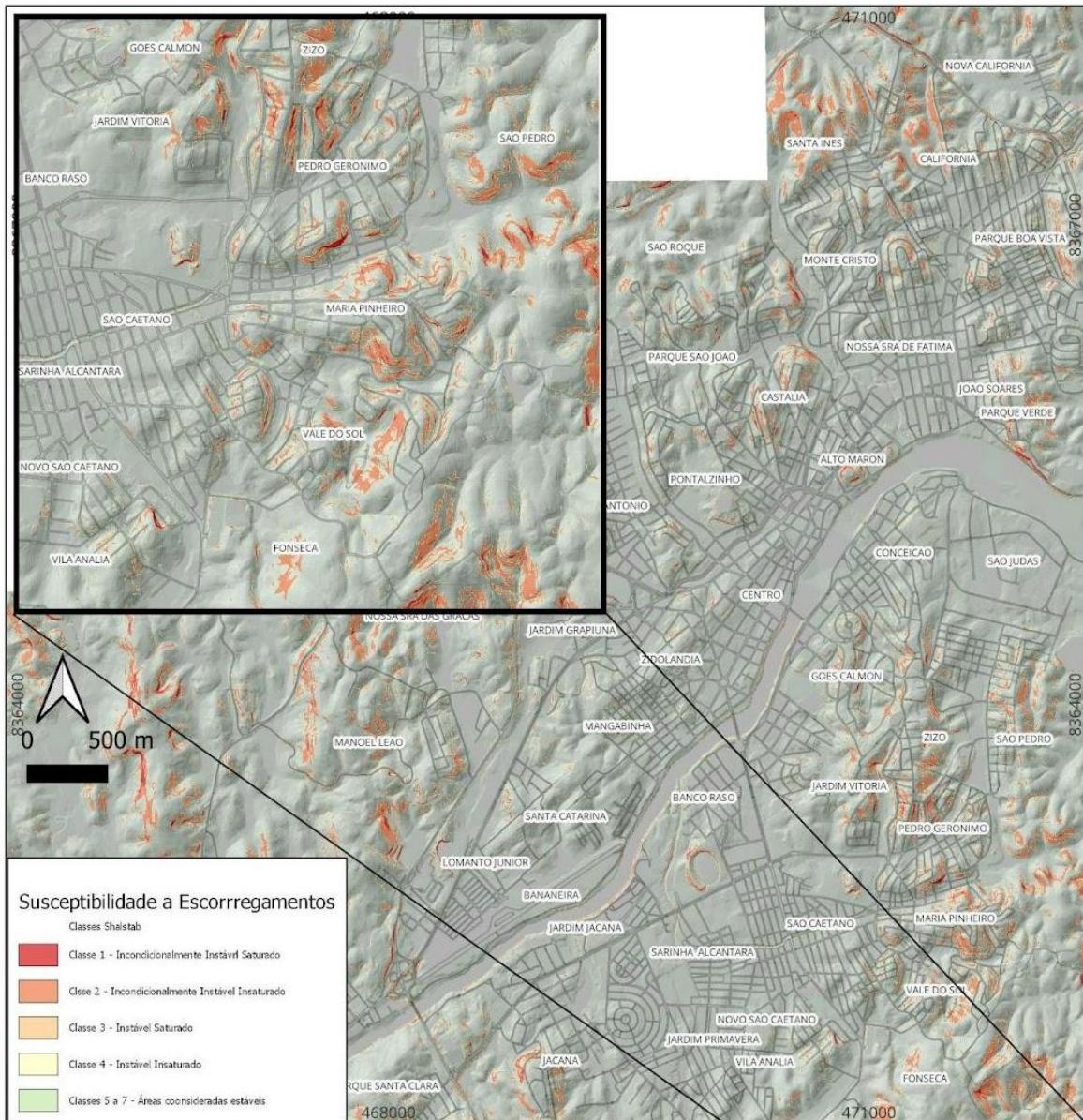
Elaboração: Silva; Gomes, 2024.

Em Itabuna, os resultados demonstraram a predominância das classes consideradas estáveis pelo modelo matemático, em comparação às classes instáveis. Somente a classe *Incondicionalmente Estável Saturado* recobriu 38,15 km², abrangendo as áreas mais planas como os topos de morros, fundos de vale e a planície aluvial do rio Cachoeira. As áreas de maior instabilidade equivalem a 1,76 km² (*Incondicionalmente Instável Insaturado*) e 0,51 km² (*Incondicionalmente Instável Saturado*) do território da cidade. Essas classes estão associadas a zonas de substrato cristalino, bem como àquelas com maior declividade, reforçando a forte influência desse parâmetro no desempenho do modelo.

As classes com maior suscetibilidade a escorregamentos estão relacionadas a declividades médias entre 17,3° e 65,4° para a classe *Incondicionalmente Instável Saturado* e entre 12° e 50,8° para a classe *Incondicionalmente Instável Insaturado*. A Figura 6 apresenta o resultado obtido pelo SHALSTAB para o cenário adotado na cidade. Com o propósito de enfatizar as áreas de maior suscetibilidade a escorregamentos, as classes estáveis foram agrupadas no mapa final.

Em Ilhéus, observam-se características semelhantes às de Itabuna, com as classes estáveis predominando sobre as instáveis. Entretanto, estas últimas se mostraram mais expressivas neste município, justificadas pelas condições geomorfológicas predominantes (Figura 7). A classe mais instável (*Incondicionalmente Instável Saturado*) abrangeu uma área de 1,23 km², enquanto a classe *Incondicionalmente Instável Insaturado* cobriu uma área de 2,51 km², sendo esta última a mais significativa entre as classes de maior suscetibilidade a escorregamentos. Ambas ocorrem sobre o embasamento cristalino, em encostas com declividades médias variando entre 6,8° e 87,8°, e entre 23,5° e 87,9°, respectivamente.

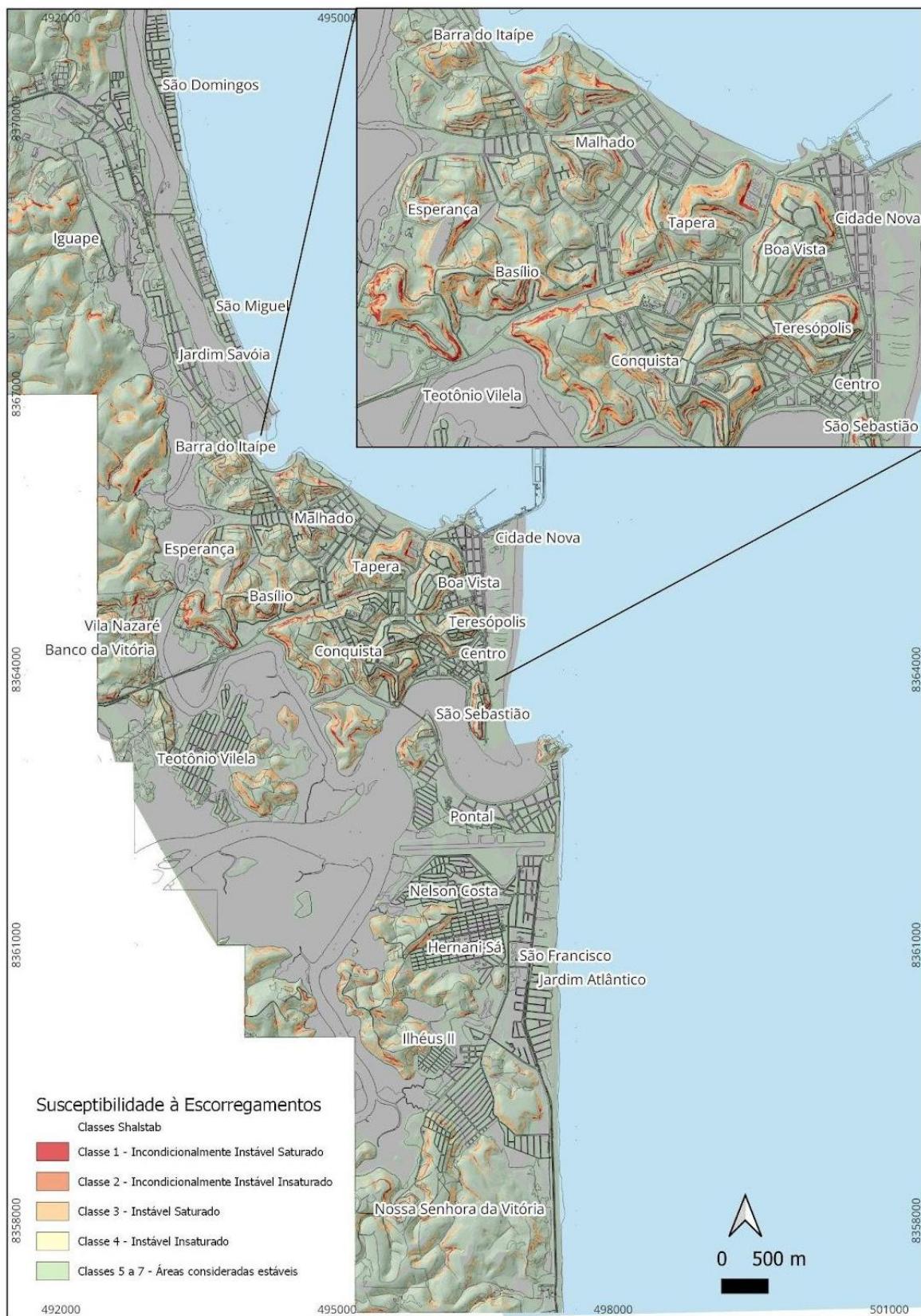
Figura 6 - Suscetibilidade a escorregamentos em Itabuna, criado pelo modelo SHALSTAB



Elaboração: Silva; Gomes, 2024.

As classes de média estabilidade (*Instável Saturado*, *Instável Insaturado* e *Estável Insaturado*) somaram, juntas, 1,69 km². Já as classes consideradas estáveis corresponderam a 0,38 km² para *Incondicionalmente Estável Insaturado* e 27,01 km² para *Incondicionalmente Estável Saturado*, sendo esta última a mais significativa, recobrindo áreas de planícies costeiras na faixa litorânea e estuarina, nas zonas baixas que margeiam os rios até o limite na base das encostas, nos fundos dos vales da área central da cidade e nos topo de morros. Para a elaboração de um mapa que privilegiasse as zonas mais instáveis, na Figura 7 também foram agrupadas as classes consideradas estáveis pelo modelo.

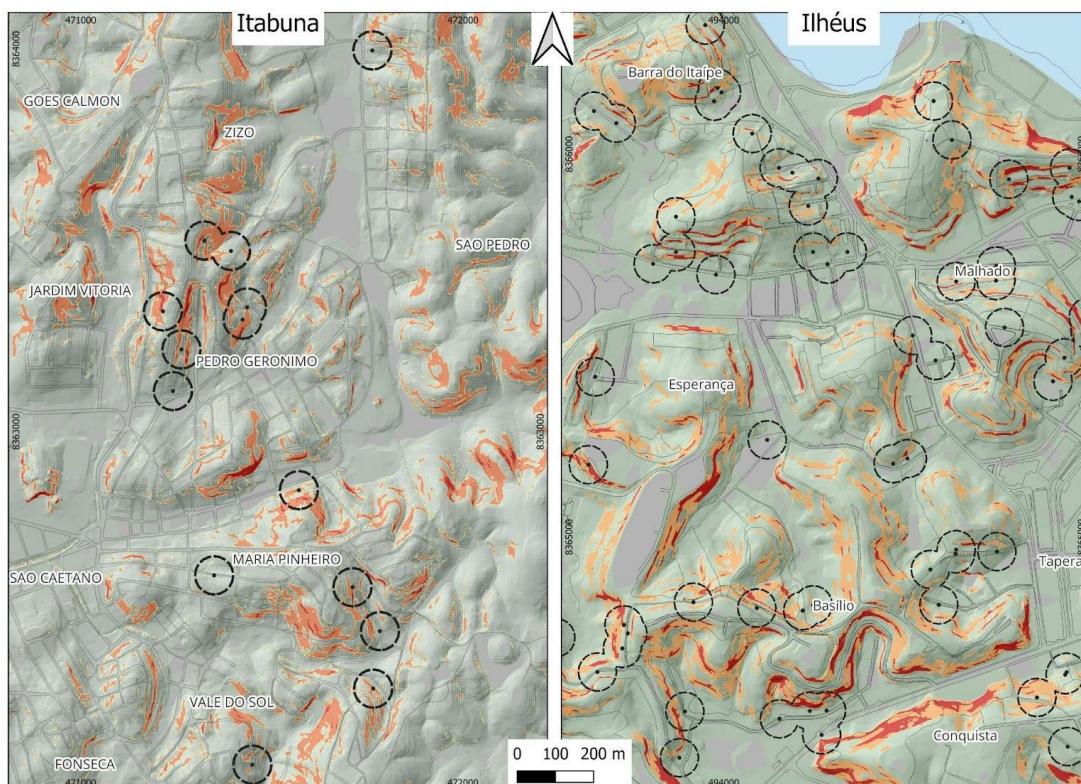
Figura 7 - Suscetibilidade a escorregamentos em Ilhéus, criado pelo modelo SHALSTAB



Elaboração: Silva; Gomes, 2024.

A análise simultânea das classes de instabilidade e do inventário de escorregamentos demonstrou que o modelo SHALSTAB identificou, de forma satisfatória, as áreas de maior suscetibilidade a escorregamentos (Figura 8). Os registros de ocorrências estão situados nas encostas de maior instabilidade ou em suas proximidades. Cabe novamente destacar que o fato de as notificações não indicarem o local exato da cicatriz, mas sim o endereço da pessoa que registrou o chamado telefônico junto à Defesa Civil, justifica a localização desses pontos na base das encostas e, por vezes, até em áreas de menor suscetibilidade.

Figura 8 - Áreas das classes 1 e 2 que ocorrem em um raio de 50 m dos pontos de registro



Elaboração: Silva; Gomes, 2024.

Quando analisadas as distâncias entre os pontos de ocorrência e as áreas das classes 1 (*Incondicionalmente Instável Saturado*) e 2 (*Incondicionalmente Instável Insaturado*), a partir da aplicação da ferramenta *Buffer* no QGIS, observou-se que 96,8% dos pontos de ocorrência em Itabuna e 89,2% em Ilhéus estão localizados a até 50 metros dessas classes, reforçando a relação entre os pontos e as áreas mais críticas. A análise do modelo, quando comparada ao inventário, pode apresentar divergências devido à possível ação antrópica sobre o meio físico, criando condições favoráveis aos escorregamentos mesmo em locais considerados estáveis.

König, Kux e Mendes (2019) identificaram áreas consideradas pelo SHALSTAB como de baixa suscetibilidade a escorregamentos, mas que apresentaram cicatrizes em bairro do município de Campos do Jordão – SP, demonstrando que as alterações antrópicas têm papel determinante na indução de rupturas. De forma semelhante, Listo e Santos (2023) apontaram que os escorregamentos na Região Metropolitana do Recife foram fortemente influenciados por ações antrópicas que desestabilizam o relevo.

Os resultados também indicaram áreas com relevo movimentado, classificadas como de alta suscetibilidade a escorregamentos, mas que não apresentam registros de ocorrências. Essas áreas instáveis, sem cicatrizes no SHALSTAB, não podem ser avaliadas diretamente, pois o modelo indica apenas zonas potencialmente instáveis (Vieira et al., 2018). Tanto em Itabuna quanto em Ilhéus, esses locais não são urbanizados, e duas situações distintas podem ocorrer: na primeira, a presença de cobertura vegetal pode contribuir para o aumento da coesão pela ação das raízes, além da interceptação da chuva que influencia na infiltração de água e na saturação do solo; na segunda, os escorregamentos podem estar ocorrendo, mas por se tratar de áreas sem ocupação, não há registros dos eventos.

Susceptibilidade da área e sua correlação com eventos extremos de chuvas

O SHALSTAB também permite identificar, para cada pixel da área analisada, a precipitação diária necessária para a ocorrência de escorregamentos, considerando-se a transmissividade do solo. As classes de suscetibilidade de 2 a 6 estão associadas aos seguintes intervalos de precipitação crítica: *Incondicionalmente Instável Insaturado* (0–30 mm/dia); *Instável Saturado* (31–100 mm/dia); *Instável Insaturado* (101–150 mm/dia); *Estável Insaturado* (151–200 mm/dia) e *Incondicionalmente Estável Insaturado* (201–999 mm/dia). Na classe 1 (*Incondicionalmente Instável Saturado*), a ruptura pode ocorrer mesmo em condições não saturadas, devido à alta declividade. Já na classe 7 (*Incondicionalmente Estável Saturado*), a encosta permanece estável mesmo sob solo completamente saturado.

Em Itabuna, conforme mostrado na Tabela 2, dentre as classes instáveis, a *Incondicionalmente Instável Insaturado* (0–30 mm/dia) foi a mais representativa em área, sendo a maioria das ocorrências mapeadas associadas a essas zonas. Silva e Gomes (2025) analisaram as precipitações acumuladas em 24 horas nos dias de escorregamentos e constataram que, para acumulados de até 10 mm, ocorreram apenas eventos simples na cidade, isto é, um único escorregamento. Considerando as ocorrências generalizadas (mais de um escorregamento no dia), 31,4% ocorreram com chuvas entre 10 e 30 mm/24h; 34,3% com chuvas entre 30 e 70 mm/24h; e 25,7% com volumes superiores a 70 mm/24h. Os autores ressaltam que, na ausência de chuvas acumuladas nos dias anteriores, escorregamentos generalizados ocorreram com precipitações superiores a 40 mm/24h. Destacam, ainda, a limitação dessa análise, dada a curta série histórica disponível e a importância da constante atualização do banco de dados.

Em Ilhéus, a classe *Incondicionalmente Instável Insaturado* também foi a mais expressiva dentre aquelas de maior suscetibilidade, seguida pela classe *Incondicionalmente Instável Saturado*. Silva e Gomes (2025) destacam que a chuva diária exerce forte influência na deflagração de escorregamentos no município. Assim como em Itabuna, precipitações inferiores a 10 mm/24h estiveram associadas a eventos simples. Nos dias com precipitações entre 10 e 30 mm, registraram-se 9,9% dos escorregamentos; 27,7% para chuvas entre 30 e 70 mm; e 58,7% para chuvas superiores a 70 mm/24h. De modo geral, escorregamentos generalizados foram deflagrados por acumulados diárias em torno de 60 mm — valor acima do limiar previsto pelo modelo. No entanto, a precipitação acumulada nos dias antecedentes reduz o limiar necessário para a ocorrência dos eventos.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Assim como em muitos municípios brasileiros, Ilhéus e Itabuna possuem áreas suscetíveis a escorregamentos que, em períodos chuvosos, estão sujeitas à ocorrência de acidentes. Os relevos dessas cidades são compostos por planícies costeiras ou fundos de vale — com baixa variação altimétrica e de declividade — e áreas de colinas e morros com topos amplos e arredondados. Em Itabuna, predominam maiores altitudes, enquanto Ilhéus apresenta declividades mais acentuadas e maior ocupação antrópica em suas encostas, o que justifica o maior número de escorregamentos registrados nesse município.

A avaliação do perigo de escorregamentos, por meio do modelo preditivo SHALSTAB, identificou de forma satisfatória as áreas de maior suscetibilidade. Em ambos os municípios, houve predominância das classes consideradas estáveis, associadas às regiões mais planas e de baixa declividade, como topos de morros, fundos de vale e planícies aluviais ou costeiras. Dentre as classes de maior suscetibilidade, a *Incondicionalmente Instável Insaturado* (classe 2) foi a mais significativa, presente em encostas de elevada declividade tanto em Itabuna quanto em Ilhéus — sendo nesta última mais expressiva em razão das condições geomorfológicas predominantes.

A comparação entre as classes de instabilidade e o inventário de escorregamentos revelou que, em sua maioria, os registros de ocorrências estão localizados sobre ou nas proximidades das áreas classificadas como de maior instabilidade. As zonas de relevo movimentado, embora classificadas como de alta suscetibilidade, mas sem registros de escorregimentos, correspondem a áreas não urbanizadas com cobertura vegetal preservada. A ausência de registros pode estar associada tanto à estabilização natural do solo como à inexistência de população residente. Além disso, o fato de as notificações não apontarem o local exato da cicatriz, mas sim o endereço do solicitante, pode justificar registros em locais de menor suscetibilidade. Por isso, recomenda-se que os registros de escorregimentos passem a dispor de informações mais precisas quanto à localização do evento.

Quanto aos limiares pluviométricos críticos, o modelo SHALSTAB indica que volumes entre 0 e 30 mm/dia já são suficientes para deflagrar escorregamentos em boa parte das áreas instáveis de Itabuna e Ilhéus. No entanto, os dados observacionais mostram que a maioria dos eventos nessas cidades foi acionada por

precipitações superiores aos limiares definidos pelo modelo. Essa predominância de volumes elevados, comuns à região, amplia a suscetibilidade nas áreas urbanas. Para valores mais baixos de precipitação diária, a ocorrência dos escorregamentos esteve associada à chuva acumulada nos dias anteriores.

REFERÊNCIAS

- ABBASZADEH SHAHRI, A.; SPROSS, J.; JOHANSSON, F.; LARSSON, S. Landslide susceptibility hazard map in southwest Sweden using artificial neural network. **Catena**, v. 183, 104225, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104225>.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; GERD, S. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. <http://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>.
- ARCANJO, J. B. A. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. **Itabuna. Folha SD.24-Y-B-VI. Estado da Bahia**. Brasília. DNPM/CPRM, 1993. 252p. Escala 1:100.000. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/8667>. Acesso em: 21 mar. 2024.
- ARROGANTE-FUNES, P.; BRUZÓN, A. G.; ARROGANTE-FUNES, F.; RAMOS-BERNAL, R. N.; VÁZQUEZ-JIMÉNEZ, R. Integration of Vulnerability and Hazard Factors for Landslide Risk Assessment. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 18, n. 22, 11987, 2021. <https://doi.org/10.3390/ijerph182211987>.
- ÁVILA, F. F.; ALVALÁ, R. C.; MENDES, R. M.; AMORE, D. J. The influence of land use/land cover variability and rainfall intensity in triggering landslides: a back-analysis study via physically based models. **Natural Hazards**, v. 105, p. 1139–1161, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04324-x>.
- BARBOSA, J. S. F.; SABATÉ, P. Geological features and the Paleoproterozoic collision of four Archaean Crustal segments of the São Francisco Craton, Bahia, Brazil. A synthesis. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 74, n. 2: p. 343-359, 2002. <https://doi.org/10.1590/S0001-37652002000200009>.
- BAUM, R. L.; SAVAGE, W. Z.; GODT, J. W. **TRIGRS - a Fortran program for transient rainfall infiltration and grid-based regional slope-stability analysis**. Open-File Report, USGS, 2002. <https://doi.org/10.3133/ofr02424>.
- BONINI, J. E.; BATEIRA, C. V. M.; DIAS, V. C.; MARTINS, T. D.; VIEIRA, B. C. Suscetibilidade a escorregamentos rasos a partir de parâmetros morfométricos e dos modelos SHALSTAB e do Valor Informativo. **Confins**, n. 46, 2020. <https://doi.org/10.4000/confins.30323>.
- BRASIL. **Lei 6.766, em 19 de dezembro de 1979**. Brasília, DF, 1979. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6766.htm. Acesso em: 30 abr. 2024.
- CABRAL, V. C.; REIS, F. A. G. V.; MENDONZA, C. M.; OLIVEIRA, A. Model-based assessment of shallow landslides susceptibility at a petrochemical site in Brazil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 23, n. 2, 2022. <http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v23i2.2084>.
- CONDER. Companhia de Desenvolvimento Urbano do Estado da Bahia. **Fotografias aéreas e base planimétrica da cidade de Ilhéus**. Salvador, 2002.
- COSTA, G. F. Avaliação da ocorrência de áreas de risco de escorregamentos em encostas na cidade de Ilhéus - BA. **Dissertação** (Mestrado em Desenvolvimento Regional e Meio Ambiente) – Ilhéus: UESC, 2015.
- CPRM - Serviço Geológico do Brasil. **Ação Emergencial para Delimitação de Áreas em Alto e Muito Alto Risco a Enchentes e Movimentos de Massa. Ilhéus, Bahia**. Departamento de Gestão Territorial – DEGET, 2013. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/18881>. Acesso em: 15 mar. 2024.
- CPRM - Serviço Geológico do Brasil. **Setorização de áreas em alto e muito alto risco a movimentos de massa, enchentes e inundações. Itabuna, Bahia**. Departamento de Gestão Territorial – DEGET, 2019. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/18883.2>. Acesso em: 15 mar. 2024.

DIETRICH, W. E.; ASUA, R. R.; COYLE, J.; ORR, B. K.; TRSO, M. A validation study of the shallow slope stability model, SHALSTAB, in the forest lands of Northern California. **Stillwater Ecosystem, Watershed & Riverine Sciences**, Berkeley, 1998.

DIETRICH, W. E.; BELLUGI, D.; ASUA, R. R. Validation of the Shallow Landslide Model, SHALSTAB, for forest management. In: WIGMOSTA, M.S.; BURGES, S.J. (Eds.) **Land use and watersheds: human influence on hydrology and geomorphology in urban and forest areas**. Washington DC: AGU, v. 2, 2001. p. 195–227.

DONG, J.; NIU, R.; LI, B.; XU, H.; WANG, S. Potential landslides identification based on temporal and spatial filtering of SBAS-InSAR results. **Geomatics, Natural Hazards and Risk**, v. 14, n. 1, p. 52–75, 2022. <https://doi.org/10.1080/19475705.2022.2154574>.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed., rev. e ampl. – Brasília, DF: Embrapa, 2018. 356 p. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1094003/sistema-brasileiro-de-classificacao-de-solos>. Acesso em: 10 mar. 2024.

FRANCO, G. B.; MARQUES, E. A. G.; CHAGAS, C. S.; GOMES, R. L.; SOUZA, C. M. P. Classificação geotécnica dos solos da Bacia do Rio Almada – Bahia. **Caminhos de Geografia**, v. 13, n. 42, p. 42 – 49, 2012. <https://doi.org/10.14393/RCG134216586>.

FRANCO, G. B. Fragilidade ambiental e qualidade da água na Bacia do Rio Almada – Bahia. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Viçosa: UFV. 2010. Disponível em: <http://locus.ufv.br/handle/123456789/823>. Acesso em: 20 fev. 2024.

FRANCO, G. B.; MENEZES A. A.; GOMES, R. L. Reconhecimento e caracterização de áreas de risco de escorregamento em Ilhéus – BA. **Revista Geografia**, v. 34, n. 3, p. 411-425, 2009. <https://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/ageteo/article/view/4008>.

GERENTE, J.; LUIZ, E. L.; GOMES JUNIOR, F. C.; PROVIDELO, L. A.; MARCHIORI, G. Utilização de diferentes derivações do modelo SHALSTAB como ferramenta de auxílio ao monitoramento da suscetibilidade de movimento de massa em bacias hidrográficas com presença de ativos de transmissão de energia. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 43, 2023. <https://doi.org/10.11606/eISSN.2236-2878.rdg.2023.196408>.

GOMES, R. L.; FRANCO, G.; TEIXEIRA, N.; MENEZES, A. Avaliação da susceptibilidade e delimitação de áreas de risco ao escorregamento em encostas do sítio urbano de Ilhéus-Ba, Brasil. **Geotecnia**, n. 114, p. 91-112, 2008. https://doi.org/10.14195/2184-8394_114_5.

GORSEVSKI, P. V. A free web-based approach for rainfall-induced landslide susceptibility modeling: Case study of Clearwater National Forest, Idaho, USA. **Environmental Modelling & Software**, v. 161, 105632, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2023.105632>.

GRASS. Geographic Resources Analysis Support System. Versão 8.3.2. Open Source Geospatial Foundation, 2024. Software.

GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. **Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação**. São Paulo: Editora da USP, 1984.

HONG, B.; SHAO, B.; WANG, B.; ZHAO, J.; QIAN, J.; GUO, J.; XU, Y.; LI, C.; ZHU, B. Using the meteorological early warning model to improve the prediction accuracy of water damage geological disasters around pipelines in mountainous areas. **Science of The Total Environment**, v. 889, 164334, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164334>.

HORA, S. B.; GOMES, R. L. Mapeamento e avaliação do risco a inundação do Rio Cachoeira em trecho da área urbana do Município de Itabuna/BA. **Sociedade & Natureza**, v. 21, n. 2, p. 57-75, 2009. <https://doi.org/10.1590/S1982-45132009000200005>.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Brasileiro de 2022**. Rio de Janeiro, 2023. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/trabalho/22827-censo-demografico-2022.html>. Acesso em: 21 mar. 2024.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Cidades**. Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/>. Acesso em: 21 mar. 2024.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Divisão regional do Brasil em regiões geográficas imediatas e regiões geográficas intermediárias: 2017**. Coordenação de Geografia. -

- Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=2100600>. Acesso em: 10 jan. 2024.
- KÖNIG, T.; KUX, H. J. H.; MENDES, R. M. SHALSTAB mathematical model and WorldView-2 satellite images to identification of landslide-susceptible areas. **Natural Hazards**, v. 97, p. 1127-1149, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11069-019-03691-4>.
- LI, Y.; ZHENG, D.; YAN, C.; WANG, Z.; NIAN, T. Spatial distributions and multi-factor driving mechanism of landslide in southern Liaodong Peninsula. **Frontiers in Ecology and Evolution**, v. 11, 1339265, 2024. <https://doi.org/10.3389/fevo.2023.1339265>.
- LIN, W.; YIN, K.; WANG, N.; XU, Y.; GUO, Z.; LI, Y. Landslide hazard assessment of rainfall-induced landslide based on the CF-SINMAP model: a case study from Wuling Mountain in Hunan Province, China. **Natural Hazards**, v. 106, p. 679–700, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04483-x>.
- LISTO, F. L. R.; SANTOS, E. M. Scenarios of susceptibility to shallow landslides using the SHALSTAB model and validation by roc curve, metropolitan region of Recife, northeastern Brazil. **Revista de Geografia**, v. 40, n. 1, 2023. <https://doi.org/10.51359/2238-6211.2023.256630>.
- MAIA, E. C. B. Estudo geotécnico e análise da estabilidade da encosta localizada na Ladeira do Pilar - comércio pertencente ao Município do Salvador-BA. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Civil) – Recife: UFPE. 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/32124>. Acesso em: 20 fev. 2024.
- MARIN, R. J.; GARCÍA, E. F.; ARISTIZÁBAL, E. Assessing the Effectiveness of TRIGRS for Predicting Unstable Areas in a Tropical Mountain Basin (Colombian Andes). **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 39, p. 2329–2346, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10706-020-01630-w>.
- MELO, C. M.; KOBIYAMA, M.; MICHEL, G. P.; DE BRITO, M. M. The Relevance of Geotechnical-Unit Characterization for Landslide-Susceptibility Mapping with SHALSTAB. **GeoHazards**, v. 2, n.4, p. 383–397, 2021. <https://doi.org/10.3390/geohazards2040021>.
- MELO, C. M.; KOBIYAMA, M. Aplicação do modelo SHALSTAB no estudo de escorregamentos no Brasil: Revisão. **Revista Brasileira De Geomorfologia**, v. 19, n. 4, 2018. <https://doi.org/10.20502/rbg.v19i4.1372>
- MERGHADI, A.; YUNUS, A. P.; DOU, J.; WHITELEY, J.; THAIPHAM, B.; BUI, D. T.; AVTAR, R.; ABDERRAHMANE, B. Machine learning methods for landslide susceptibility studies: A comparative overview of algorithm performance. **Earth-Science Reviews**, v. 207, 103225, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103225>.
- MICHEL, G. P.; KOBIYAMA, M.; GOERL, R. F. Comparative analysis of SHALSTAB and SINMAP for landslide susceptibility mapping in the Cunha River basin, southern Brazil. **Journal of Soils and Sediments**, v. 14, n. 7, p. 1266-1277, 2014. <https://doi.org/10.1007/s11368-014-0886-4>.
- MONTGOMERY, D. R.; DIETRICH, W. E. A physically based model for the topographic control on shallow landsliding. **Water Resources Research**, v. 30, n. 4, p. 1153–1171, 1994. <https://doi.org/10.1029/93WR02979>.
- MONTGOMERY, D. R.; SULLIVAN, K.; GREENBERG, H. M. Regional test of a model for shallow landsliding. **Hydrological Processes**, v. 12, n. 6, p. 943-955, 1998. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(199805\)12:6<943::AID-HYP664>3.0.CO;2-Z](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(199805)12:6<943::AID-HYP664>3.0.CO;2-Z).
- 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. <https://doi.org/10.1029/WR022i005p00794>.
- PACK, R. T.; TARBOTON, D. G.; GOODWIN, C. N. Terrain Stability mapping with SINMAP, Technical description and users guide for version 1.00. **Civil and Environmental Engineering Faculty Publications**, 2582, 1998.
- PINHO, T. M.; AUGUSTO FILHO, O. Landslide susceptibility mapping using the infinite slope, SHALSTAB, SINMAP, and TRIGRS models in Serra do Mar, Brazil. **Journal of Mountain Science**, v. 19, n. 4, p. 1018-1036, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11629-021-7057-z>.
- PRIETO, C. C.; MENDES, R. M.; SIMÕES, S. J. C.; NOBRE, C. A. Comparação entre a aplicação do modelo SHALSTAB com mapas de suscetibilidade e risco de deslizamentos na bacia do Córrego

Piracuama em Campos do Jordão - SP. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 69, n. 1, p. 71-87, 2017. <https://doi.org/10.14393/rbcv69n1-44033>.

QGIS. Geographic Information System. Versão 3.34.7. Beaverton: Open Source Geospatial Foundation, 2024. Software.

SAHA, S.; SARKAR, R.; ROY, J.; HEMBRAM, T. K.; ACHARYA, S.; THAPA, G.; DRUKPA, D. Measuring landslide vulnerability status of Chukha, Bhutan using deep learning algorithms. **Scientific Reports**, v. 11, 16374, 2021. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-95978-5>.

SANTOS, E. M.; LISTO, F. L. R. Escorregamentos translacionais rasos no município de Camaragibe, região metropolitana do Recife: Uma análise preliminar a partir do modelo SHALSTAB. **Revista de Geociências do Nordeste**, v. 5, n. 2, p. 131–145, 2019. <https://doi.org/10.21680/2447-3359.2019v5n2ID18438>.

SEINFRA - Secretaria de Infraestrutura do Estado da Bahia. **Projeto executivo de engenharia e execução das obras de duplicação pela margem direita do Rio Cachoeira, pavimentação em CBUQ e obras de arte correntes e especiais na BR-415/BA**. Estudo geológicos e geotécnicos, v. 3, t. I e II, 2021.

SHOU, K.-J.; CHEN, J. On the rainfall induced deep-seated and shallow landslide hazard in Taiwan. **Engineering Geology**, v. 288, 106156, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106156>.

SILVA, N. L.; GOMES, R. L. Características e comportamento das chuvas como agente potencializador do perigo a escorregamentos em encostas em áreas urbanas de Itabuna e Ilhéus, Bahia. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.18, n.2, 2025. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v18.2.p1579-1606>.

TSANGARATOS, P.; LOUPASAKIS, C.; NIKOLAKOPOULOS, K.; ANGELITSA, V.; ILIA, I. Developing a landslide susceptibility map based on remote sensing, fuzzy logic and expert knowledge of the Island of Lefkada, Greece. **Environmental Earth Sciences**, v. 77, 363, 2018. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7548-6>.

UNDRR - United Nations Office for Disaster Risk Reduction. **Report of the open-ended intergovernmental expert working group on indicators and terminology relating to disaster risk reduction**. 2016. Disponível em: <https://www.undrr.org/publication/report-open-ended-intergovernmental-expert-working-group-indicators-and-terminology>. Acesso em: 19 mar. 2024.

UNDRR - United Nations Office for Disaster Risk Reduction. **The human cost of disasters: an overview of the last 20 years (2000-2019)**. 2020. Disponível em: <https://www.undrr.org/publication/human-cost-disasters-overview-last-20-years-2000-2019#:~:text=In%20the%20period%202000%20to,over%20the%20previous%20twenty%20years>. Acesso em: 19 mar. 2024.

VIEIRA, B. C.; FERNANDES, N. F.; AUGUSTO FILHO, O.; MARTINS, T. D.; MONTGOMERY, D. R. Assessing shallow landslide hazards using the TRIGRS and SHALSTAB models, Serra do Mar, Brazil. **Environmental Earth Sciences**, v. 77, 260, 2018. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7436-0>.

XIAO, Z.; XU, C.; HUANG, Y.; HE, X.; SHAO, X.; CHEN, Z.; XIE, C.; LI, T.; XU, X. Analysis of spatial distribution of landslides triggered by the Ms 6.8 Luding earthquake in China on September 5, 2022. **Geoenvironmental Disasters**, v. 10, 3, 2023. <https://doi.org/10.1186/s40677-023-00233-w>.

Recebido em: 07/04/2025

Aceito para publicação em: 23/05/2025