



## **SUSCETIBILIDADE A DESLIZAMENTOS PELO MÉTODO ESTATÍSTICO BIVARIADO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIACHO DO SILVA, MACEIÓ, ALAGOAS, BRASIL**

Walber Mendes Gama

Doutor em Geografia pelo Instituto de Geografia e Ordenamento do Território (IGOT) da Universidade de Lisboa (UL), Lisboa, Portugal  
[walber.gama@campus.ul.pt](mailto:walber.gama@campus.ul.pt)

Nivaneide Alves de Melo Falcão

Professora do Programa de Pós-Graduação em Geografia - PPGG, da Universidade Federal de Alagoas - UFAL, Alagoas, Brasil  
[nivaneide.melo@igdema.ufal.br](mailto:nivaneide.melo@igdema.ufal.br)

**RESUMO** – A cartografia de deslizamento, a partir do método estatístico bivariado, é a peça fundamental para medidas de prevenção de danos materiais e perdas de vidas na bacia hidrográfica do riacho do Silva. Para tanto, foi elaborado inventário de deslizamentos com uso de imagens de satélites de alta resolução associados aos fatores de predisposição declividade, inverso de Wetness index mais a cartografia geomorfológica e de uso do solo para construção do modelo de suscetibilidade na bacia hidrográfica. O modelo apresentou 0,92 da área abaixo da curva de validação que mostra excelente resultado. A área de estudo apresentou os 13,66 % de suscetibilidade muito alta; 7,96 % alta; 3,63 % Moderada; 74,72 Baixa ou nula. Os deslizamentos na área de estudo estão associados a intervenção nas vertentes erosivas pela retirada de material por escavações e da vegetação para implantação moradias fazendo sobrecarga que bloqueiam o escoamento da água e favorece a infiltração. O modelo de suscetibilidade fornece base para planos de monitoramento, contingência, alerta e ações estratégicas de prevenção como também ser incorporado em planos de ordenamento do território na bacia hidrográfica do riacho do Silva.

Palavras-chave Suscetibilidade; Sistema de Informação Geográfica; Deslizamentos; Valor Informativo.

## **SUSCEPTIBILITY TO LANDSLIDE BY THE BIVARIATE STATISTICAL METHOD IN THE RIACHO DO SILVA BASIN, MACEIÓ, ALAGOAS, BRAZIL**

**ABSTRACT** – The landslide mapping from the bivariate statistical method is the key to measures for prevention of material damage and loss of life in the Silva river basin. For this, a landslide inventory was prepared using high-resolution satellite images associated with slope predisposition factors, inverse Wetness index plus geomorphological and land use cartography to build the susceptibility model in the watershed. The model showed 0.92 of the area under the validation curve which shows excellent result. The study area showed the 13.66 % very high susceptibility; 7.96 % high; 3.63 % Moderate; 74.72 Low or zero. The landslides in the study area are associated with the intervention on the erosive slopes by the removal of material by excavations and vegetation for implantation of housing making overload that block the water runoff and favor infiltration. The susceptibility model provides the basis for plans for monitoring, contingency, alert and strategic preventive actions, as well as being incorporated into land management plans for the Silva river basin.

Keywords: Susceptibility; Geographic Information System; Landslide; Informative Value.

## INTRODUÇÃO

O potencial de danos materiais causados por deslizamentos devido o transporte de massa destrói assentamentos humanos, interrompe as comunicações, danificam gasodutos, água e esgoto e causam ferimentos nas pessoas e perdas de vidas (GAIDZIK, e RAMÍREZ-HERRERA, 2021). Entre 1998 – 2017 estima-se que os deslizamentos afetaram 4,8 milhões de pessoas e causaram aproximadamente 18 414 mortes (MIZUTORI e GUHA-SAPIR, 2018). Em Maceió, Alagoas, Brasil os deslizamentos de terras têm sido recorrentes e resultaram em 69 mortes desde 1988 a 2020. Destaque para o ano de 2017 com 07 perdas de vidas (soterradas), 01 desaparecida e 1700 famílias que precisaram de aluguel social (SANCHEZ et al., 2013) e uma 01 morte no ano de 2021 em Maceió (LEÃO et al., 2021). O crescimento populacional em áreas de risco de deslizamentos aumenta devido a migração e à medida que as cidades expandem (HOLCOMBE et al., 2016). A ocupação humana, ocorre em áreas suscetíveis a múltiplos perigos preexistentes onde os riscos aumentam (RUSK et al., 2022).

A Redução do Risco de Desastres (DRR) de deslizamentos evitam impactos catastróficos pelas ações de Mitigação, Preparação, Resposta e Recuperação (TWIGG, 2004). Para tanto, necessitam identificar as áreas de riscos de deslizamentos pelo que são cruciais para estabelecer políticas que concentrem esforços nas áreas mais vulneráveis (MODUGNO et al., 2022). Pelo que é necessário ter informações de ocorrência de deslizamentos passados e atuais para identificar áreas onde os deslizamentos podem ocorrer no futuro (GUZZETTI et al., 2012). Por meio de interpretação de imagens de satélites de alta resolução, a exemplo, a plataforma GoogleEarth, são elaborados banco de dados de deslizamentos (WUBALEM, 2021; MERSHA & METTEN, 2020; GOLOVKO et al., 2017; BROECKX et al., 2017). O inventário de deslizamentos inclui os mapeamentos dos deslizamentos de terras passados e este método também inclui a coleta e registro de dados de localização, tipo e dimensões dos deslizamentos (SHANO et al., 2020).

Os inventários de deslizamentos geralmente carecem de informações suficientes de datas de ocorrência que permita estimar a probabilidade de ocorrência de deslizamentos, bem como a magnitude esperada dos eventos. Diante dessa limitação de dados detalhados que permitam calcular a probabilidade de ocorrência de deslizamentos, são elaborados mapas qualitativos (PELLICANI et al., 2013). Assim, se recorre a elaboração de mapas de suscetibilidade pelos fatores de predisposição (declividade, solos, litologia, geomorfologia, e outros, caso necessite) associados aos deslizamentos inventariados. A confiabilidade da cartografia da suscetibilidade a deslizamentos depende da qualidade do inventário de deslizamentos (GUZZETTI et al., 2012) e escala de trabalho e análise (AYALEW e YAMAGISHI, 2005).

No mapeamento direto, o geomorfólogo, com base em sua experiência e conhecimento das condições do terreno, determina diretamente o grau de suscetibilidade. Já no mapeamento indireto, se utiliza de modelos estatísticos ou determinísticos para determinar áreas propensas a deslizamentos (VAN WESTEN et al., 2003). Métodos indiretos de avaliação da suscetibilidade a deslizamentos tem sido elaborado por diversos autores e por diferentes métodos: estatísticos (ARABAMERI et al., 2019; ZÊZERE et al., 2017), análise multi-critério (EL JAZOULI et al., 2019; SHAHABI e HASHIM, 2015; KLIMEŠ e RIOS ESCOBAR., 2010) e machine learning (HAMED I et al., 2022; AZARAFZA et al., 2021; YOUSSEF et al., 2021).

A cartografia da suscetibilidade pode, eventualmente, ser utilizada no ordenamento do território e na avaliação qualitativa dos riscos (MELO e ZÊZERE, 2017). É também, o primeiro passo para monitorar e reduzir as perdas de vidas, retirar as pessoas expostas ao perigo e reduzir os danos materiais que se dá com a identificação das áreas de maiores propensões a ocorrência de deslizamentos. Mapas de suscetibilidade a deslizamentos são muito importantes para uma gestão eficaz dos riscos de deslizamentos e planejamento futuro (ABBAS et al., 2021; BASHARAT et al., 2016; COROMINAS et al 2014; DAI et al., 2002; CASCINI 2005). Como também, avalia o risco associado à população, as infraestruturas locais e subsidiar programas de

proteção civil que visam minimizar as perdas humanas e materiais por deslizamentos de terras (OLIVEIRA et al., 2017; HERVÁS e BOBROWSKY, 2016). A análise de risco de deslizamento é útil para localizar as zonas onde o risco é maior, mas é uma tarefa complexa e demorada, principalmente quando o estudo é realizado em escala municipal (GUILLARD-GONÇALVES et al., 2016).

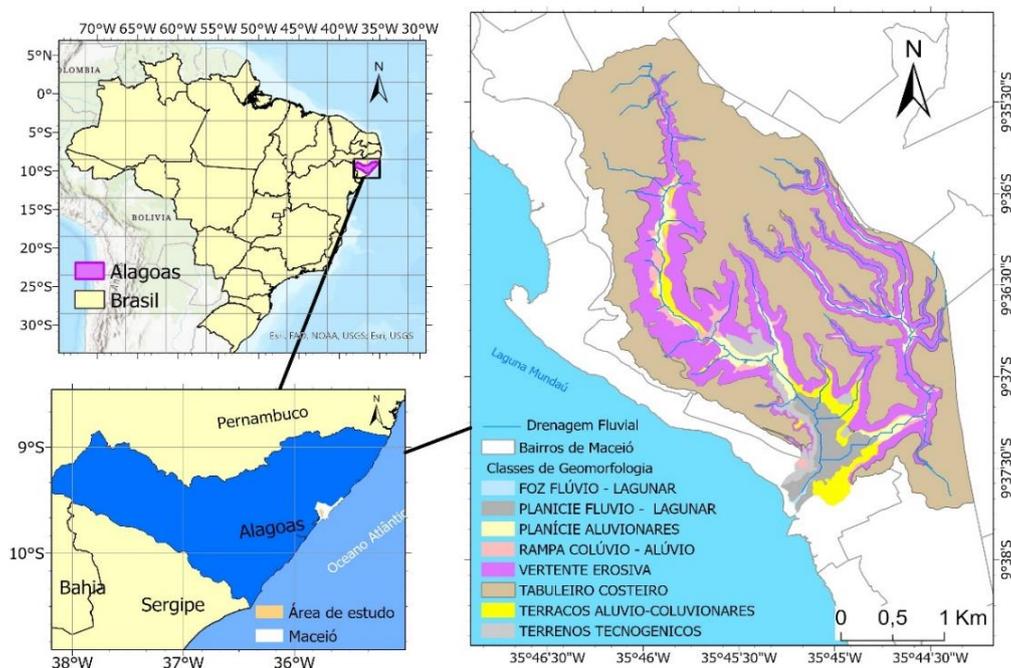
Para tanto, este trabalho tem como objetivo obter um modelo de suscetibilidade a deslizamentos na bacia hidrográfica do riacho do Silva a escala de detalhe 1/2000. Onde é feita a identificação das áreas potenciais de ocorrência de deslizamentos de terras que se recorre a um método estatístico bivariado (Valor Informativo). Dessa forma, é feita a elaboração dos fatores condicionantes a ocorrência de deslizamentos como também um banco de dados de deslizamentos, o inventário.

## CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A avaliação da suscetibilidade a deslizamento se dá na bacia hidrográfica urbana do riacho do Silva, situada na zona oeste do município de Maceió com área de 10 km<sup>2</sup>, comprimento do curso d'água maior é 6,25 km, a declividade média da bacia hidrográfica é de 8,5 graus e máxima de 84,2; a elevação média de 51,2 metros, máxima de 95 e mínima de 1 na região de sua foz na laguna Mundaú (Figura 1).

Quanto a geomorfologia, compreende os tabuleiros costeiros planos; as vertentes erosivas em locais de elevados declives de maiores potenciais de ocorrências de deslizamentos; as rampas de colúvio-alúvio nas áreas de acumulação de material movimentado entre a vertente erosiva e terraços alúvio-coluvionares; em declives menos acentuados as bordas de terraços e, nos fundos de vales, as planícies fluviais (flúvio lagunar) em locais de baixo declive (Figura 1).

**Figura 1.** Localização da área de estudo, a bacia hidrográfica do riacho do Silva, no Brasil, Alagoas, Maceió e as classes de relevo e sua rede de drenagem fluvial.



Compreende um ambiente de rochas sedimentares da formação Barreiras no tabuleiro costeiro com predomínio de sedimentos areno-argilosos; sedimentos aluvionares em setores de menores declives num ambiente recente do período quaternário.

No que se refere ao predomínio dos solos, compreendem os Latossolos nos platôs dos tabuleiros costeiros, nas encostas íngremes predominam os Argissolos; em menores cotas altimétricas os Neossolos-Quartzarênicos, Gleissolos e na foz do rio os solos indiscriminados de Mangue em ambiente Flúvio-lagunar. No caso da cidade de Maceió, os sedimentos das encostas são predominantemente de arenosos finos a arenosos grossos com pedregulho, estando os siltes e as argilas presentes em menores percentagens (Anjos, 2004).

Quanto a precipitação e temperaturas, as normais climatológicas (1961 – 1990) pela estação Maceió (INMET) apresentam temperatura média de 24,8°C e o total anual de precipitação de 2070,5 mm; a temperatura média no período de 1981 – 2010 é levemente maior (25,1°C) e a precipitação decresce para 1867,4 mm em relação as normais climatológicas de 1961 a 1990 (Gama, 2021).

Quanto ao Uso do solo da bacia hidrográfica, é predominantemente urbano com áreas residenciais e comerciais em áreas planas de tabuleiros e, nas vertentes e no fundo de vale, há ocupação de moradias caracterizadas aglomerados subnormais onde estão expostas aos riscos de inundações fluviais e deslizamentos. Há também, áreas significativas que revestem as vertentes de florestas ombrófilas em duas unidades de conservação e áreas de sucessão vegetal e de “Brejos” e mangues nos terrenos úmidos na planície flúvio – lagunar. Sem coberto vegetal há as vias não pavimentadas que compõem as áreas de solo exposto, como também áreas de retirada de material de empréstimo de solo para construção de moradias em áreas de corte e aterro.

## **METODOLOGIA**

### **INVENTÁRIO DE DESLIZAMENTOS**

Para a elaboração do modelo de suscetibilidade a deslizamentos de terras na bacia hidrográfica do riacho do Silva foi elaborado inventário de deslizamentos a partir da identificação de cicatrizes de deslizamentos com base em imagens de satélites de alta resolução pela plataforma GoogleEarth, Bing Aerial anos 2017, 2020 e 2021 e visitas em campo nos anos 2018 e 2020. Os deslizamentos foram identificados e representados em geometria de polígonos nos locais de roturas nas vertentes e este dado se refere a variável dependente do Valor Informativo. Os dados são armazenados num Banco de Dados Geográfico (BDG) num Sistema de Informação Geográfica (SIG) onde permitiu calcular suas dimensões e posterior cruzamento com as variáveis independentes, os fatores de predisposição, para o cálculo do Valor Informativo.

### **Modelo de suscetibilidade a deslizamento de terras**

Para a elaboração da suscetibilidade foram utilizadas as seguintes variáveis geográficas, os fatores de predisposição: Altimetria; Geomorfologia; Uso do solo; inverso do *Wetness Index* – IWI e Declividade. Dados estes em escala de detalhe, tendo por base o MNT - Modelo Numérico do Terreno a escala 1/2000, gerado a partir de uma rede irregular triangulada (TIN, *Triangulated Irregular Network*). O modelo TIN foi construído com informação vetorial, pré-eventos, pontos cotados e curvas de nível com equidistância de 1 m; da base cartográfica digital da Prefeitura de Maceió, ano 2000.

A partir destas informações foi elaborado a morfometria do relevo, relevo sombreado, altimetria (MNT), declividade e imagens de satélites de alta resolução em ambiente SIG que possibilitou a identificação, vetorização das classes de relevo e elaboração do mapeamento geomorfológico com apoio de material teórico, o manual de geomorfologia IBGE (2009), o mapeamento

geomorfológico de Maceió a escala de 1/50 000 (RODRIGUES et al., 2013) e 1/125 000 (DANTAS et al., 2019). Adicionalmente, foram realizadas visitas em campo para identificação e validação das feições do relevo.

A declividade em graus foi derivada do Modelo Numérico do Terreno (MNT) e posteriormente calculado a variável que determina locais potenciais de armazenamento de água no solo, o Inverso do *Wetness Index*, obtido com base na equação (1) desenvolvida por BEVEN e KIRKBY (1979):

$$IWI = \ln(a/\tan\beta) \quad (1)$$

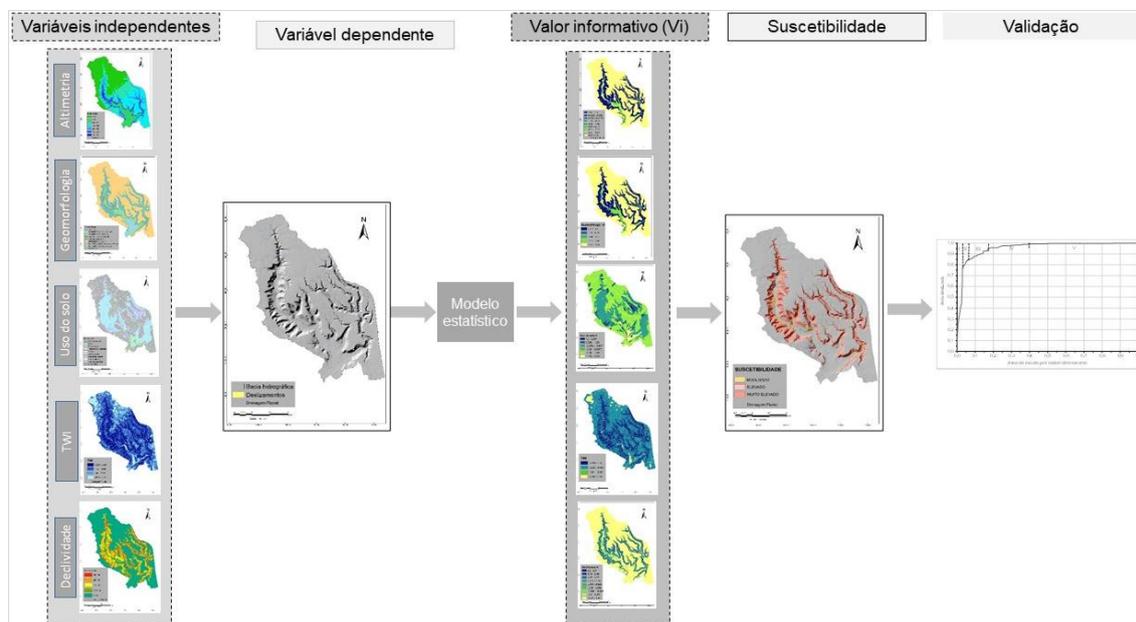
onde  $a$ , se refere à área de contribuição da célula; e  $\beta$  corresponde ao seu declive.

Mais também, para aplicação do modelo Valor Informativo, foi elaborado o mapa de uso do solo na mesma escala de detalhe (1/2000) com base em imagens de satélite GoogleEarth ano 2021 em ambiente SIG, onde foram identificadas e vetorizadas, manualmente, e obtido o Uso e Ocupação do Solo da bacia hidrográfica do riacho do Silva.

### Valor informativo

O método estatístico bivariado Valor Informativo (VI), tem sido aplicado em diversos trabalhos de modelagem a deslizamentos (YAN, 1988; WU, 2000; ZÊZERE, 2002; ZÊZERE et al., 2004; PEREIRA et al, 2012; GARCIA, 2012; OLIVEIRA et al., 2015; BA et al; FAROOQ et al., 2021). A modelagem é feita pelo cálculo e integração das variáveis independentes, os fatores de predisposição, e as variáveis dependente, os deslizamentos, para alcançar a suscetibilidade e posteriormente a validação avaliar o nível de predição do modelo (**Figura 2**).

**Figura 2.** Fluxograma modelo de suscetibilidade a deslizamentos pelo método estatístico valor informativo (VI).



Nesse modelo estatístico, é levada em consideração a probabilidade *a priori* para toda a área em estudo e a probabilidade condicionada é calculada para cada classe de fator de predisposição (Equação 2).

$$I_i = \log_n \frac{S_i/N_i}{S/N} \quad (2)$$

$I_i$  – valor informativo da variável  $i$  (classe  $x$  do fator de predisposição  $y$ );  $S_i$  – número de unidades de terreno com deslizamentos e presença da variável  $i$ ;  $N_i$  – número de unidades de terreno com a presença da variável  $i$ ;  $S$  – total de unidades de terreno com deslizamentos;  $N$  – total de unidades de terreno da área em estudo. O valor final é produto da soma do valor informativo calculado para cada variável, fator predisposição, pela equação 3.

$$I_j = \sum_{i=1}^n X_{ji} \times I_i \quad (3)$$

Sendo:  $I_j$  - valor informativo da unidade de terreno;  $n$  – número de variáveis;  $X_{ji}$  – presença (1) ou a ausência (0) da variável na unidade de terreno;  $I_i$  – valor informativo da variável. Após a aplicação do método estatístico foi feita a validação dos resultados para avaliar a qualidade do modelo; para isso foi feito o cálculo da curva de sucesso, realizado de acordo com as áreas deslizadas e as áreas do modelo de suscetibilidade utilizadas para o cálculo do  $V_i$ :

$$AAC = \sum_{i=1}^n \left[ (L_{si} - L_i) \times \frac{a_i + b_i}{2} \right] \quad (4)$$

Sendo:  $AAC$  – área abaixo da curva;  $L_{si}$  – o valor superior do intervalo (abscissas);  $L_i$  - o valor inferior do intervalo (abscissas);  $a_i$  – valor da ordenada correspondente;  $b_i$  – valor da ordenada dependente;  $i$  – número de intervalo de valor ou número da classe.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

No que se refere aos fatores de predisposição (**Figura 3**) utilizados na elaboração da suscetibilidade a deslizamentos e suas relações com a influência desses fatores na ocorrência de deslizamentos se constatam que:

### a) Geomorfologia

A geomorfologia é um fator determinante nas áreas de ocorrência de deslizamentos, que pelas classes de relevo mapeada indicam as áreas com predisposição a movimentações de massa. Dessa maneira, na área de estudo as áreas de maiores propensões a deslizamentos são as vertentes erosivas, mas também as rampas de Colúvio–Alúvio são passíveis de movimento de massa (**Figura 1**).

### b) Uso do solo

As intervenções humanas representadas espacialmente pelo uso do solo apresentam alteração do relevo a partir da retirada de material de empréstimo e corte de vertentes para implantação de moradias e implantação de aterro; os terrenos tecnogênicos além da retirada da vegetação das vertentes mais implantação das infraestruturas hidráulicas e lançamento de água e esgoto *in situ* nas vertentes erosivas. Vale ressaltar, que os deslizamentos geralmente podem ser desencadeados em vertentes naturais como também em vertentes alteradas pelo homem (AMIN et al., 2022).

### c) Declividade (°)

A declividade é o fator determinante de propensão a ocorrência de deslizamentos. A ação da gravidade segue a tendência da inclinação e influencia o transporte de material controlando a progressão, velocidade e distância do movimento que aumentam em área com maiores declives (ÇELLEK, 2020).

### d) Altimetria (m)

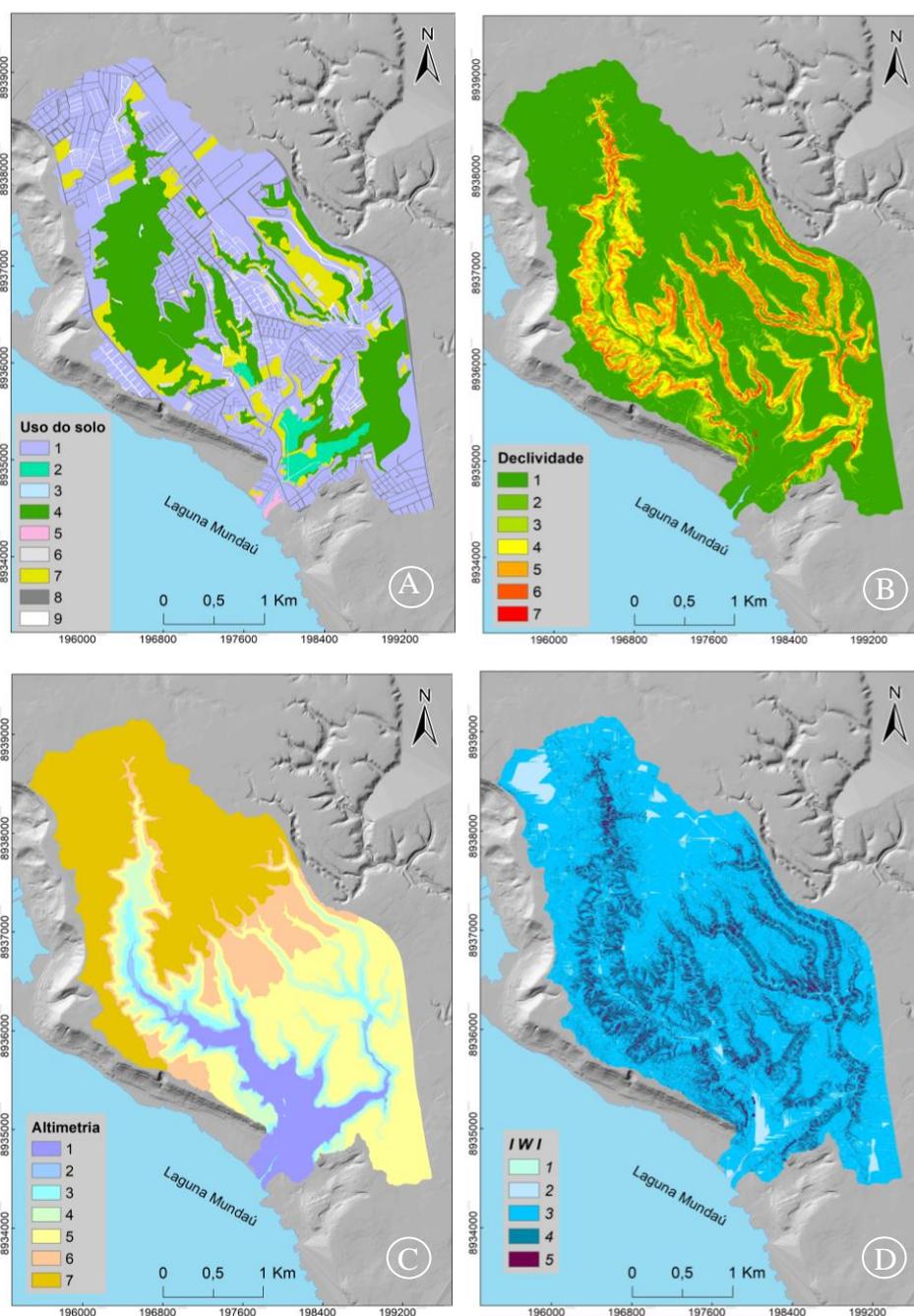
No que refere a elevação se constata que há um patamar de altitude que correspondem as áreas mais propensas a deslizamentos com altitudes e que representam as áreas de roturas dos deslizamentos nas bordas das vertentes, na linha de ruptura do relevo. Segundo DAI e LEE (2002) a frequência de deslizamentos em cumes de montanhas é alta; nas elevações intermédias as encostas tendem a ser coberto por um colúvio fino, que é mais propenso a deslizamentos e,

em elevações muito baixas, a frequência de deslizamentos de terra é baixo porque o terreno em si é suave, e é coberto com coluvião espesso ou/e solos residuais.

a) *IWI*

Este índice representa o armazenamento de umidade no solo associado ao controle hidrológico da água subterrânea (SØRENSEN et al., 2006). Representa as áreas de maiores propensões a ocorrências de deslizamentos associados aos declives mais fortes e de saturação do solo para desencadeia deslizamentos; os valores mais elevados do índice do Inverso *Topography Wetness Index* são coincidentes com áreas de maior perigo de movimento de massa na área de estudo.

**Figura 3.** Variáveis independentes utilizadas no modelo estatístico Valor Informativo: a) Uso do Solo; b) declividade; c) Altimetria; d) *IWI* - Inverso do *Topography Wetness Index*.



### Inventário de deslizamentos

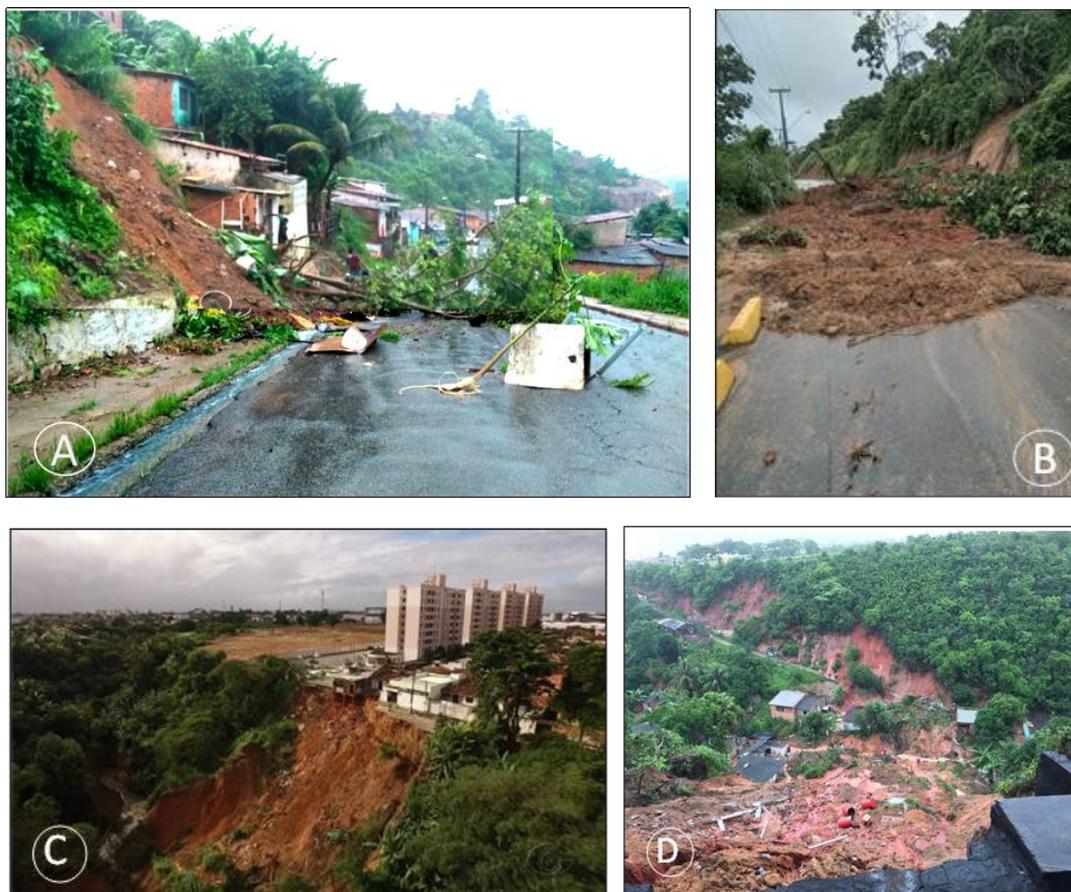
A partir da utilização de um Sistema de Informação Geográfica e manipulação de imagens de satélites de alta resolução espacial da base na plataforma GoogleEarth e Bing Aerial e por visitas em campo foram identificados 117 deslizamentos inventariados (**Figura 4**).

Se constata que os deslizamentos na área de estudo, a bacia hidrográfica do riacho do Silva, ocorrem em locais onde houve alguma intervenção antrópica: corte da vertente para implantação de estradas, construção de moradias, retirada de vegetação como também decorrente da implantação de infraestruturas hidráulicas e tubulações que lançam efluentes sobre as vertentes que assim, no período chuvoso, causam deslizamentos ou desabamento dos taludes tal como apresentado em registro de deslizamentos numa estrada (**Figura 4a**) e outro desabamento de talude que bloqueou uma estrada no ano de 2021 (**Figura 4b**).

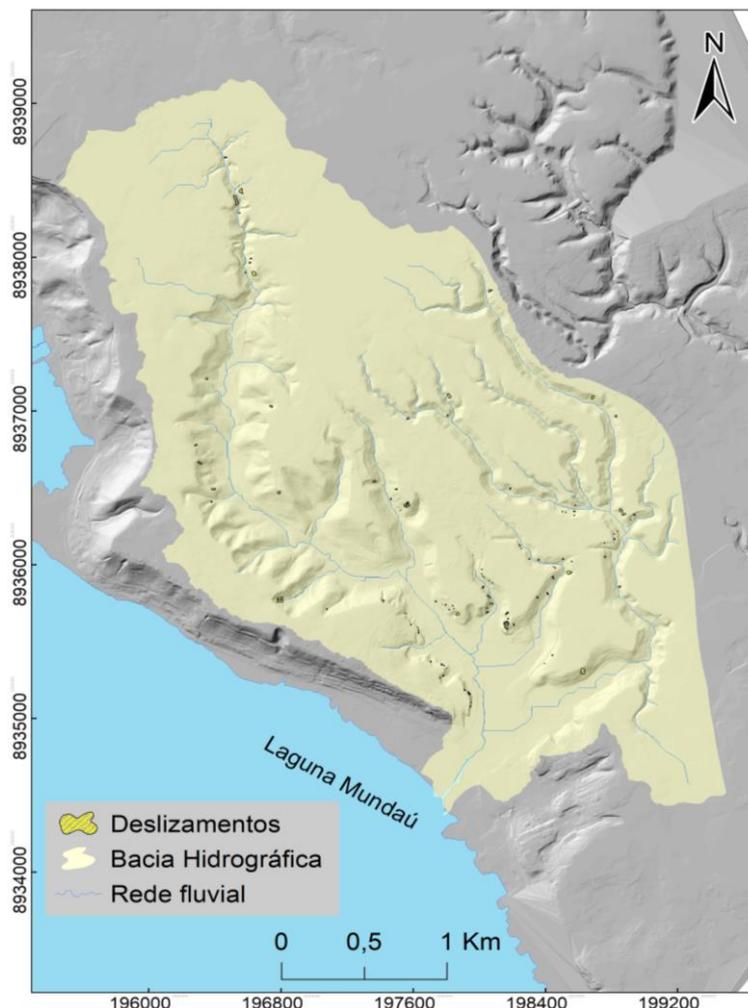
E no ano 2017, houve dois deslizamentos com grande fluxo de material a partir dos limites de uma casa e de um condomínio residencial (**Figura 4c**) e outro ocasionou o soterramento de casas situadas no fundo do vale, resultou em morte de uma pessoa e deixou outra desaparecida (**Figura 4d**).

Portanto, com a identificação dos deslizamentos e elaboração do inventário, foi possível calcular as áreas dos deslizamentos que, de forma geral, possuem em média  $96,2 \text{ m}^2$ , máximos  $821,1 \text{ m}^2$ , mínimos  $1,6 \text{ m}^2$  e o total de área deslizada de  $11 740,9 \text{ m}^2$  (**Figura 5**).

**Figura 4.** a) Desabamento com queda de árvore numa via no bairro Chã da Jaqueira; b) deslizamento e solo residual carregado na estrada no bairro Chã da Jaqueira; c) deslizamento nos fundos de um conjunto residencial; d) deslizamento que causou soterramento e morte de uma pessoa.



**Figura 5.** Mapa com a localização dos deslizamentos inventariados na bacia hidrográfica do riacho do Silva.



### Suscetibilidade a deslizamentos na bacia hidrográfica do riacho do Silva

Com as elaborações das variáveis independente e dependentes e o cálculo do Valor Informativo se observa que, as classes de uso do solo e declividade apresentaram maiores pontuações do Valor Informativo com valores máximos para o solo exposto e declividade acima de 45 graus (**Tabela 1**). A maior pontuação foi alcançada pela variável uso do solo nas áreas de solo exposto com cicatrizes de deslizamentos em áreas que houve retiradas de vegetação, onde as vertentes permanecem expostas a ação da precipitação em maiores declives.

Nas áreas de rebordo erosivo/vertente erosiva, foi a classe que obteve maior pontuação da variável representativa do relevo, a geomorfologia. São nessas áreas que apresentam maiores predisposição a ocorrência de deslizamentos em declives elevados na bacia hidrográfica. No que se refere a Altimetria, apresentou pontuações significativas na maioria das classes com maior pontuação para a classe de elevação de 25 a 45 metros.

Quanto a variável que representa o armazenamento de água no solo Inverso de *Wetness Index*, apresentou maior pontuação para o índice de umidade nas áreas de vertentes erosivas aonde o armazenamento de água satura o solo, favorece a rotura e resultam em deslizamentos.

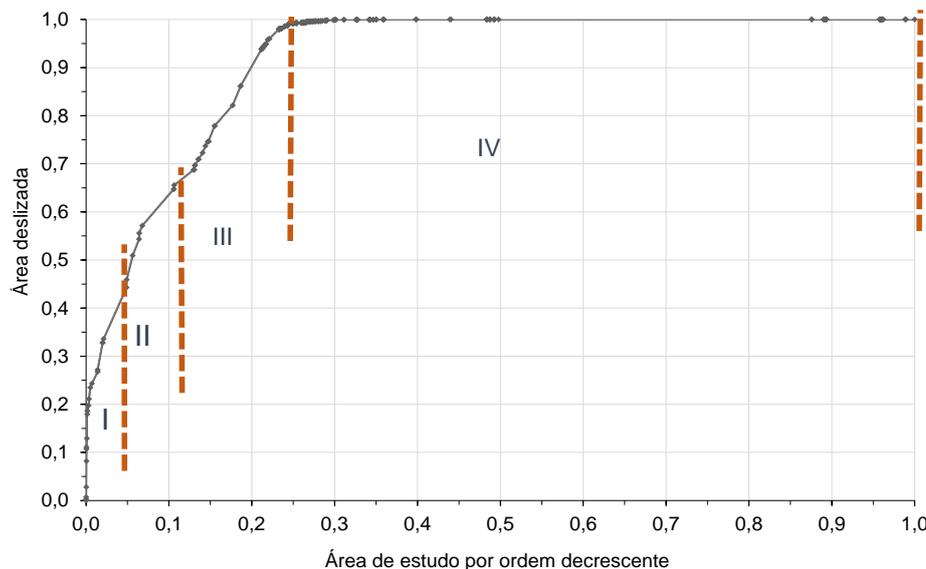
**Tabela 1.** Resultados do valor informativo para variáveis de predisposição.

	Classes	Área (m <sup>2</sup> )	Área deslizada (m <sup>2</sup> )	VI
<b>Uso do solo</b>				
1	Area urbanizada	5295928	1668	-1,259
2	Brejo	254239	0	-3,082
3	Corpo d'águas	16807	0	-3,082
4	Fragmentos Florestais	2714667	4622	0,428
5	Mangue	30303	0	-3,082
6	Solos exposto	116366	2315	2,887
7	Sucessão vegetal	947829	2674	0,933
8	Vias asfaltadas	648389	33	-3,082
9	Vias não asfaltada	226452	60	-1,432
<b>Geomorfologia</b>				
1	Laguna	8849	0	-8,83
2	Planície Aluvionares	400998	11	-3,67
3	Planície fluvio - lagunar	345353	0	-8,83
4	Rampa colúvio - Alúvio	216559	123	-0,64
5	Rebordo erosivo	2409286	10888	1,44
6	Tabuleiro costeiro	6342224	1	-8,83
7	Terracos aluvio- coluvionares	329064	0	-8,83
8	Terrenos tecnogênicos	197953	3	-4,26
<b>Declividade (°)</b>				
1	0 – 5	6682481,00	0,00	-1,92
2	5 – 10	695681,00	113,00	-1,92
3	10 – 15	462694,00	245,00	-0,74
4	15 – 25	949150,00	2778,00	0,97
5	25 – 35	994623,00	3926,00	1,27
6	35 – 45	395931,00	3164,00	1,97
7	45 – 84,22	69406,00	1145,00	2,70
<b>Altimetria (m)</b>				
1	0 -10	970901,00	9	-4,79
2	10 – 15	193439,00	279	0,26
3	15 – 25	456492,00	915	0,59
4	25 – 45	1163801,00	4611	1,27
5	45 – 65	2654081,00	2756	-0,07
6	65 – 80	1161156,00	2640	0,72
7	>80	3650036,00	167	-3,19
<b>IWI</b>				
1	-28 – -14,9	39098	0	-6,18
2	-14,8 – -11,7	434392	1	-6,18
3	-11,6 – 4,35	7082212	2772	-1,04
4	-4,34 – -2,59	2107768	5640	0,88
5	-2,58 – -2,28	586162	2972	1,52

### Validação do modelo de suscetibilidade a deslizamentos

O modelo de deslizamentos apresentou excelente resultado de validação a partir do resultado da curva de sucesso com taxa de predição de 0,92. A partir das quebras da curva de sucesso foi realizado a classificação da suscetibilidade em quatro classes: muito alta (I), alta (II), moderada (III) e baixa ou nula (IV) apresentado a seguir (**Figura 6**) e cálculo das áreas e frequência das classes de suscetibilidade na bacia hidrográfica do riacho do Silva (**Tabela 2**).

**Figura 6.** Curva de sucesso obtida para validação do modelo de suscetibilidade com quebras de valores.



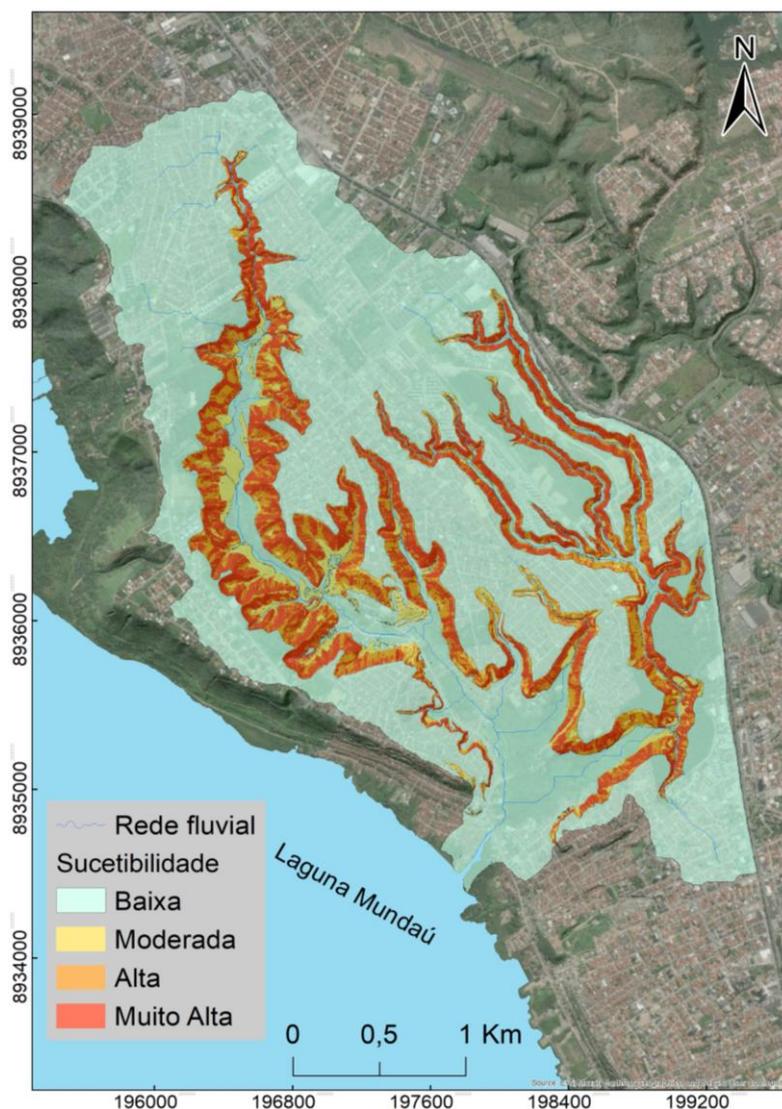
### Identificação dos níveis de suscetibilidade a deslizamento na bacia hidrográfica

O que se constatada na bacia hidrográfica a partir da classificação e elaboração do modelo de suscetibilidade a deslizamentos são: as áreas de suscetibilidade muito alta e alta estão relacionados as vertentes erosivas de elevadas declividades constituídas de Argissolos; são áreas de solos exposto em vertentes de forte declive, com potencial de armazenamento de unidade e escoamento subsuperficial; condições essas propícias a desencadear deslizamentos; a suscetibilidade moderada compreendem os solos em rampas de colúvio – alúvio situados em menores patamares das vertentes erosivas em zonas formadas por acumulação de material provenientes das zonas mais altas das vertentes; a suscetibilidade é baixa ou nula em terrenos planos nos tabuleiros costeiros numa área predominantemente urbanizada e nos fundos de vales e planície Flúvio – Lagunar (**Figura 7** e **Tabela 2**).

Em áreas de suscetibilidade muito alta e alta nos vales mais estreitos encaixados indicam áreas potenciais de deslizamentos e sua deflagração podem formar barramento dos cursos d'água que ao se romper potencializa o transporte de carga sólida para a jusante

Os deslizamentos na área de estudo, a bacia hidrográfica do riacho do Silva, estão associados a algum tipo de alterações antrópica no relevo pelos cortes e aterros, retirada de vegetação, lançamentos de água e esgoto nas vertentes ou algum tipo de represamento do escoamento da água na vertente que favorece a circulação da água pela infiltração no solo que instabiliza a vertente pela saturação do solo e provocam deslizamentos.

Além disso, as intervenções presentes, destaca-se a sobrecarga provocada pelas edificações que também constituem barreiras ao escoamento superficial, incrementando as infiltrações. A descaracterização da forma do talude pela ação de escavações e a retirada da cobertura vegetal existente, entre outras ações promovidas pelo assentamento, também são extremamente prejudiciais (ANJOS, 2004). Além disso, as tubulações em subsuperfície intensifica a circulação da água no subsolo que instabiliza a vertente e causam os deslizamentos (**Figura 7**).

**Figura 7.** Modelo de suscetibilidade a deslizamentos na bacia hidrográfica do riacho do Silva.**Tabela 2.** Distribuição das classes de suscetibilidade pelas áreas e frequência de deslizamentos na bacia hidrográfica do riacho do Silva.

Suscetibilidade	Área (km <sup>2</sup> )	Frequência (%)
Muito Alta	1,4	13,66
Alta	0,81	7,96
Moderada	0,37	3,63
Baixa ou nula	7,6	74,72

## CONCLUSÃO

O modelo representou adequadamente as áreas potenciais de ocorrências de deslizamentos/desabamentos de taludes na bacia hidrográfica do riacho do Silva. A elaboração do inventário de deslizamento em escala de detalhe permitiu realizar a caracterizações dos deslizamentos pelas suas dimensões. E se torna relevante neste trabalho a elaboração das cartografias da geomorfologia e do

uso do solo em escala de detalhe, variáveis estas fundamentais para a elaboração do modelo de suscetibilidade e caracterização ambiental da bacia hidrográfica do Riacho do Silva.

O modelo de suscetibilidade a deslizamentos elaborado, é o passo inicial para dar subsídio a planos de monitoramento, contingência, alerta e tomadas de medidas de ações estratégicas de prevenção de perdas de vidas, pessoas feridas e danos materiais na bacia hidrográfica do riacho do Silva.

Como também, ser a base para tomadas de medidas de mitigação, recomposição de taludes revestimento vegetal; direcionamento em casos excepcionais a implantação de medidas estruturais tais como os sistemas drenagem pluvial assim como a manutenção dos existentes. E dar suporte as ações de fiscalização e preservação/conservação ambiental na área de estudo a evitar retirada de material das vertentes como também para implantação de assentamentos humanos nas áreas suscetíveis a deslizamentos e condução de medidas de controle ambiental na bacia hidrográfica do Riacho do Silva.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesse estudo, por meio do uso de um Sistema de Informação Geográfica se alcançou a elaboração de um inventário de deslizamentos e elaboração do modelo de suscetibilidade por um método estatístico bivariado que apresentou excelente desempenho pelo método de validação, a curva de sucesso. Assim, possibilitou também fazer adequadamente a caracterização e distribuição espacial das áreas e níveis de perigo a deslizamento a escala de detalhe 1/2000, na bacia hidrográfica do riacho do Silva. Se constata com a aplicação do Valor Informativo, que as áreas de predisposição aos deslizamentos estão associadas aos fortes declives de 45 a 84,22 graus em vertentes erosivas e em áreas de solo expostos.

Além disso, esse estudo apresenta contribuições de pesquisa com a aplicação de um método conceituado no meio científico internacional para avaliação de deslizamentos. A partir deste trabalho, torna-se possível incorporar o mapeamento da suscetibilidade a deslizamento com identificações áreas de riscos no planejamento urbano, tal como em plano diretor e plano municipal de redução de risco na bacia hidrográfica do riacho do Silva, Maceió, Alagoas.

## AGRADECIMENTOS

Para o desenvolvimento deste trabalho se ressalta a importância do trabalho desenvolvido em campo dado o apoio da Defesa Civil de Maceió, Alagoas.

## REFERÊNCIAS

ABBAS, H.; HUSSAIN, D.; KHAN, G.; UL HASSAN, S. N; KULSOOM, I; HUSSAIN, S. Landslide Inventory and Landslide Susceptibility Mapping for China Pakistan Economic Corridor (CPEC)'s main route (Karakorum Highway). *Journal of Applied and Emerging Sciences*, v.11, p.1-18, 2021.

ALAGOAS. Superintendência de Produção da Informação e do Conhecimento – SINC. Identificação do Número de Grotas para o Projeto Vida Nova nas Grotas, 2019. Maceió: Secretaria de Estado de Planejamento, Gestão e Patrimônio, 22p. Disponível em: <<http://dados.al.gov.br/dataset/identificacao-das-grotas-de-maceio-al>>. Acesso em: 12 de jan. 2021.

AMIN, M. N. et al. Computer-Aided Slope Stability Analysis of a Landslide—A Case Study of Jhika Gali Landslide in Pakistan. *Sustainability*, v. 14, p. 12954, 2022.

ANJOS, C, A, M. Ocupação de encostas urbanas: uma dicotomia sócio-ambiental. In: *Geografia Espaço, Tempo e Planejamento*. Edufal, 2004.

ARABAMERI, A.; PRADHAN, B.; REZAEI, K.; LEE, C. W. Assessment of landslide susceptibility using statistical-and artificial intelligence-based FR–RF integrated model and multiresolution DEMs. *Remote Sensing*, v.11, p. 1-26. 2019.

- AYALEW, L.; YAMAGISHI, H. The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan. *Geomorphology*, v.65, p. 15-31, 2005.
- AZARAFZA, M.; AZARAFZA, M.; AKGÜN, H.; ATKINSON, P. M.; DERAKHSHANI, R. Deep learning-based landslide susceptibility mapping. *Scientific reports*, v.11, p. 1-16, 2021.
- Ba, Q et al. An improved information value model based on gray clustering for landslide susceptibility mapping. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, v. 6, p. 1-18, 2017.
- BASHARAT, M.; SHAH, H. R.; HAMEED, N. Landslide susceptibility mapping using GIS and weighted overlay method: a case study from NW Himalayas, Pakistan. *Arabian Journal of Geosciences*, v.9, p.1-19, 2016.
- BEVEN, K.J.; KIRKBY, M.J. A physically based variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin*, v. 24, p. 43–69, 1979.
- BRASIL. Ministério das Cidades. Plano Municipal de Redução de Risco – Versão Final. Produto 5 – Volume1. 69p, (2007). Disponível em: <[https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosSNPU/Biblioteca/PrevencaoErradicacao/Produto\\_5\\_Maceio\\_V1.pdf](https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosSNPU/Biblioteca/PrevencaoErradicacao/Produto_5_Maceio_V1.pdf)>. Acesso em: 05 de jan. 2021.
- BRASIL. Ministério da Integração Nacional. Política Nacional de Defesa Civil. Brasília: Secretaria Nacional de Defesa Civil. 82p, 2007. Disponível em: <<https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosDefesaCivil/ArquivosPDF/publicacoes/pndc.pdf>>. Acesso em: 06 de jan. 2021
- BROECKX, J.; VANMAERCKE, M.; DUCHATEAU, R.; JEAN POESEN. A data-based landslide susceptibility map of Africa. *Earth-Science Reviews*, v. 185, p. 102 – 121, 2017.
- CARDINALI, M. et al (2002). A geomorphological approach to the estimation of landslide hazards and risks in Umbria, Central Italy. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v.2, p. 57-72, 2002.
- CASCINI, L.; BONNARD, C.; COROMINAS, J.; JIBSON, R.; MONTERO-OLARTE, J. Landslide hazard and risk zoning for urban planning and development. In: Hungr, O.; Fell, R.; Couture, R.; EBERHARDT, E. (Coord.) *Landslide Risk Management*. London, UK, 2005. p. 199–235.
- CASTRO, A. L. C. et. al. Manual de Planejamento em Defesa Civil – Volume I. Ministério da Integração Nacional – Secretaria de Defesa Civil,70p, 1999. Disponível em: <<https://www.gov.br/mdr/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/protecao-e-defesa-civil-sedec>>. Acesso em: 19 de out. 2020.
- ÇELLEK, S. Effect of the slope angle and its classification on landslide. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, p. 1-23, 2020.
- COROMINAS, J.; VAN WESTEN, C.; FRATTINI, P. Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. *Bull. Engineer Geology Environmental*. 73, 209–263, 2014.
- DAI, F. C.; LEE, C. F. Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong. *Geomorphology*, v. 42, p. 213-228, 2002.
- DAI, F.C.; LEE, C.F.; NGAI, Y.Y. Landslide risk assessment and management: An overview. *Engineer Geology*. 64, 65–87, 2002.
- EL JAZOULI, A., BARAKAT, A., & KHELLOUK, R. GIS-multicriteria evaluation using AHP for landslide susceptibility mapping in Oum Er Rbia high basin (Morocco). *Geoenvironmental Disasters*, v.6, p.1-12, 2019.
- FAROOQ, S.; AKRAM, M, S. Landslide susceptibility mapping using information value method in Jhelum Valley of the Himalayas. *Arabian Journal of Geosciences*, v. 14, p. 1-16, 2021.
- GAIDZIK, K.; RAMÍREZ-HERRERA, M. T. The importance of input data on landslide susceptibility mapping. *Scientific reports*, v. 11, p. 1 – 14, 2021.
- GAMA, W. M. Análise multi-perigo de fenómenos naturais na bacia hidrográfica do rio Mundaú (Brasil). Tese (Doutorado em Geografia) – Lisboa: UL. 2021
- GARCIA, R. A. C. Metodologias de avaliação da perigosidade e risco associado a movimentos de vertente. Aplicação na bacia do rio Alenquer. Dissertação de doutoramento em Geografia, especialidade Geografia Física, Instituto de Geografia e Ordenamento do Território, Universidade de Lisboa. Lisboa. 437 p, 2012.

GOLOVKO, D.; ROESSNER, S.; BEHLING, R.; WETZEL, H. U.; KLEINSCHMIT, B. Evaluation of remote-sensing-based landslide inventories for hazard assessment in Southern Kyrgyzstan. *Remote Sensing*, v.9, p. 943, 2017.

GUILLARD-GONÇALVES, C.; ZÊZERE, J. L.; PEREIRA, S.; GARCIA, R. A. Assessment of physical vulnerability of buildings and analysis of landslide risk at the municipal scale: application to the Loures municipality, Portugal. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v. 16, p. 311-331, 2016.

GUZZETTI, F. et al. Landslide inventory maps: New tools for an old problem. *Earth-Science Reviews*, v.112, p. 42–66, 2012.

GUZZETTI, F.; MONDINI, A. C.; CARDINALI, M.; FIORUCCI, F.; SANTANGELO, M.; CHANG, K. T. Landslide inventory maps: New tools for an old problem. *Earth-Science Reviews*, v.112, p. 42-66, 2012.

HAMEDI, H.; ALESHEIKH, A. A.; PANAH, M.; LEE, S. Landslide susceptibility mapping using deep learning models in Ardabil province, Iran. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, v. 36, p. 4287-4310, 2022.

HERVÁS, J.; BOBROWSKY, P. Mapping: inventories, susceptibility, hazard and risk, 2009.

HOLCOMBE, E. A.; BEESLEY, M. E.; VARDANEGA, P. J.; SORBIE, R. (2016). Urbanisation and landslides: hazard drivers and better practices. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Civil Engineering*. v. 169, p. 137-144, 2016.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Censo Demográfico 2010. Rio de Janeiro: IBGE, 2010. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/9662-censo-demografico-2010.html?edicao=9675&t=downloads>. Acesso em: 07 de jan. 2021.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Manual Técnico de Geomorfologia. 2ª ed. Rio de Janeiro: 2009. 175 p. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/sbsr2015/files/p0836.pdf>. Acesso em: 11 de abril de 2023.

KLIMEŠ, J.; RIOS ESCOBAR, V. A landslide susceptibility assessment in urban areas based on existing data: an example from the Iguaçu Valley, Medellín City, Colombia. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v. 10, p. 2067-2079, 2010.

Leão, Vivi; Farias, Michelle; Amaral, Ricardo. Bebê de 10 meses desaparece após queda de barreira na Chã da Jaqueira, em Maceió. *G1 AL e TV Gazeta*. Maceió, 15 de jun. de 2021. Disponível em: <<https://g1.globo.com/al/alagoas/noticia/2021/06/15/bebe-desaparece-apos-queda-de-barreira-na-cha-da-jaqueira-em-maceio.ghtml>> Acesso em: 25 jan. 2022.

MELO, R.; ZÊZERE, J. L. Avaliação da suscetibilidade à rutura e propagação de fluxos de detritos na bacia hidrográfica do rio Zêzere (Serra da Estrela, Portugal). *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v.18, p. 1 – 26, 2017.

MERSHA, T.; METEN, M. GIS-based landslide susceptibility mapping and assessment using bivariate statistical methods in Simada area, northwestern Ethiopia. *Geoenvironmental disasters*, v.7, p, 1-22, 2020.

MIZUTORI, M.; GUHA-SAPIR, D. Economic losses, poverty and disasters 1998–2017. United Nations office for disaster risk reduction, v. 4, p. 9-15, 2018.

MODUGNO, S.; JOHNSON, S. C. M.; BORRELLI, P.; ALAM, E.; BEZAK, N.; BALZTER, H. Analysis of human exposure to landslides with a GIS multiscale approach. *Natural Hazards*, v.112, p. 387- 412, 2022.

OLIVEIRA, S. C.; ZÊZERE, J. L.; CATALÃO, J.; NICO, G. The contribution of PSInSAR interferometry to landslide hazard in weak rock-dominated areas. *Landslides*, v. 12, p. 703-719, 2015.

OLIVEIRA, S. C.; ZÊZERE, J. L.; GUILLARD-GONÇALVES, C.; GARCIA, R. A., PEREIRA, S. Integration of landslide susceptibility maps for land use planning and civil protection emergency management. In SASSA K.; MIKOŠ, MATJAŽ.; YIN, YUEPING (Coord.) 2017. *Advancing Culture of Living with Landslides: Sendai: Partnerships 2015-2025*, Springer International Publishing, 2017. p. 543-553.

PARIZOTO et al. Atlas Brasileiro de Desastres Naturais 1991 A 2012, Volume Brasil, 2ª edição revisada e ampliada, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, p. 2013.

PELLICANI, R.; VAN WESTEN, C. J.; SPILOTRO, G. Assessing landslide exposure in areas with limited landslide information. *Landslides*, v.11, p. 463-480, 2013.

- PEREIRA, S.; ZÊZERE, J. L.; BATEIRA, C. Assessing predictive capacity and conditional independence of landslide predisposing factors for shallow landslide susceptibility models. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v. 12, p. 979, 2012.
- RODRIGUES, B. T.; C. S. Q. C.; MELO, N. A. Potencial de movimento de massa no município de Maceió-Alagoas. *Geo Uerj*, v. 1, p. 207-227, 2013.
- RUSK, J.; MAHARJAN, A.; TIWARI, P.; CHEN, T. H. K.; SHNEIDERMAN, S.; TURIN, M.; SETO, K. C. Multi-hazard susceptibility and exposure assessment of the Hindu Kush Himalaya. *Science of the total environment*, v. 804, p. 1-14, 2022.
- SANCHEZ et al. Atlas Brasileiro de Desastres Naturais – 1991 a 2012, v.2, 2013. Alagoas, 2ª edição revisada e ampliada, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. Disponível em: <https://s2id.mi.gov.br/paginas/atlas/>. Acesso em: 03 de abril de 2023.
- SAUTI, N.S., DAUD, M.E., KAAMIN, M., SAHAT, S. Development of an exposure vulnerability index map using GIS modeling for preliminary seismic risk assessment in Sabah, Malaysia. *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*, v. 16, p. 111-119, 2021.
- SHAHABI, H.; HASHIM, M. (2015). Landslide susceptibility mapping using GIS-based statistical models and Remote sensing data in tropical environment. *Scientific reports*, v.5, p 1 – 15, 2015.
- SHANO, L.; RAGHUVANSHI, T. K.; METEN, M. Landslide susceptibility evaluation and hazard zonation techniques—a review. *Geoenvironmental Disasters*, 7, p. 1-19, 2020.
- SØRENSEN, R.; ZINKO, U.; SEIBERT, J. On the calculation of the topographic wetness index: evaluation of different methods based on field observations. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 10, p. 101–112, 2006.
- TARBOTON, D. G.; DASH, P.; E SAZIB, N. TauDEM 5.3. Guide to Using the TauDEM Command Line Functions, p. 29, 2015.
- TWIGG, J. Mitigation and preparedness in development and emergency programming. *Good Practice Review*. Publish-on-Demand Ltd., UK, 2004.
- UNDRR - United Nations Office for Disaster Risk Reduction. *Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction*, 2019. 425p.
- VAN WESTEN, C. J.; RENGERS, N.; SOETERS, R. (2003). Use of geomorphological information in indirect landslide susceptibility assessment. *Natural hazards*, v. 30, p. 399-419, 2003.
- WU, Y.; YIN, K.; LIU, Y. (2000). Information analysis for landslides hazard zonation. *Landslides in research, theory, and practice*. Proceeding of the 8th ISL, Cardiff. Thomas Telford, Londres, Vol.3, p. 1593-598, 2000.
- WUBALEM, AZEMERAW. Landslide inventory, susceptibility, hazard and risk mapping. In: YUANZHI ZHANG E QIUMING CHENG. (Coord.) *Landslides*. Intechopen, 2021. p. 181-214.
- YAN, T. Z. Recent advances of quantitative prognoses of landslides in China. *Proceedings 5th International Symposium on Landslides*, Lousanne, Balkema, Rotterdam, 2, p.1263-1268, 1988.
- YOUSSEF, A. M.; POURGHASEMI, H. R. (2021). Landslide susceptibility mapping using machine learning algorithms and comparison of their performance at Abha Basin, Asir Region, Saudi Arabia. *Geoscience Frontiers*, v. 12, p. 639-655, 2021.
- ZÊZERE, J. L. ET AL. Integration of spatial and temporal data for the definition of different landslide hazard scenarios in the area north of Lisbon (Portugal). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v. 4, p.133-146, 2004.
- ZÊZERE, J. L. Landslide susceptibility assessment considering landslide typology. A case study in the area north of Lisbon (Portugal). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v.2, p. 73-82, 2002.
- ZÊZERE, J. L., PEREIRA, S., MELO, R., OLIVEIRA, S. C., GARCIA, R. A. (2017). Mapping landslide susceptibility using data-driven methods. *Science of the total environment*, v. 589, p. 250-267, 2017.