



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbge>



Aplicação do índice estatístico e análise multicritério no mapeamento da suscetibilidade a deslizamentos no município do Ipojuca, Pernambuco, Brasil

Cristiana Coutinho Duarte¹; Roberto Quental Coutinho²; Betânia Queiroz da Silva³; Hugo Manoel Henrique⁴

¹Graduação em Bacharelado em Geografia- Universidade Federal de Pernambuco, Mestrado e Doutorado em Geografia também pela Universidade Federal de Pernambuco. Professora adjunta do Departamento de Ciências Geográficas da Universidade Federal de Pernambuco. E-mail: crisdad@hotmail.com ²Graduação em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Pernambuco Mestrado e Doutorado em Engenharia Civil, professor Titular da Universidade Federal de Pernambuco. E-mail: roberto.coutinho@ufpe.br ³Doutoranda em Geotecnia, no Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da UFPE, com ênfase em Cartografia Geotécnica. Mestre em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação com ênfase em Cartografia, Fotogrametria e SIG. Bacharel em Geografia, e-mail: betania.queiroz@ufpe.br ⁴ Possui graduação em Engenharia Agrícola e Ambiental pela Universidade Federal Rural de Pernambuco, Mestrado em Geotecnia pela Universidade Federal de Pernambuco (2014). Atualmente faz Doutorado em Geotecnia pela Universidade Federal de Pernambuco. e-mail: hugomhenrique@gmail.com

Artigo recebido em 14/03/2023 e aceito em 28/01/2024

RESUMO

A presente pesquisa tem como objetivo analisar a relação entre os deslizamentos e seus fatores condicionantes e mapear a suscetibilidade a deslizamentos na área de expansão urbana, entre os distritos de Ipojuca Sede e Nossa Senhora do Ó, do município de Ipojuca, Pernambuco, utilizando-se o modelo estatístico de análise bivariada, denominado Índice Estatístico (IE), integrado à análise multicritério AHP (Analytic Hierarchy Process). Assim como, analisar o desempenho deste modelo na predição das áreas suscetíveis a tais processos. A base para elaboração e adaptação dos dados temáticos à escala 1:10.000 foram as ortofotocartas na escala 1:1.000 e o Modelo Digital do Terreno (MDT), os quais foram gerados, respectivamente, por levantamento aerofotogramétrico e LIDAR (Light Detection and Ranging). Verificou-se que os deslizamentos predominantes na área têm superfície de ruptura translacional paralela ao talude, comumente deflagrados pela ação da água das chuvas e/ou águas servidas. Desta forma o modelo analisou os fatores condicionantes litologia, solos, uso e cobertura da terra, declividade e curvatura de vertentes, os quais foram cruzados com o inventário de deslizamentos com representação pontual localizado na superfície de ruptura. A unidade espacial foi a célula de grade (pixel). Utilizou-se o IE para determinar o peso das classes de cada fator condicionante. Os índices básicos Accountability e Reliability, assim como, os pesos dos fatores (Wf), forneceram o grau de contribuição de cada fator condicionante nos deslizamentos e subsidiaram o preenchimento da matriz de comparação pareada da AHP. Constatou-se que o uso e cobertura da terra é mais determinante na ocorrência dos deslizamentos, acompanhado da declividade, solos, curvatura e litologia. O modelo gerado a partir da integração entre o Índice Estatístico e AHP apresentou um excelente desempenho com uma AAC=0,931 (93%) e uma excelente performance com uma AAC=0,906 (90%) para a avaliação da suscetibilidade a deslizamento no município.

Palavras-chave: Índice Estatístico, Suscetibilidade, AHP, deslizamentos, GIS

Application of Statistical Index and Multicriteria Analysis in Mapping Landslide Susceptibility in the municipality of Ipojuca, Pernambuco, Brazil

ABSTRACT

The present research aims to analyze the relationship between landslides and their conditioning factors, as well as to map landslide susceptibility in the urban expansion area between the districts of Ipojuca Sede and Nossa Senhora do Ó, in the municipality of Ipojuca, Pernambuco. The study utilizes the statistical bivariate analysis model known as the Statistical Index (IE), integrated with the Analytic Hierarchy Process (AHP) multicriteria analysis. Additionally, the research evaluates the performance of this model in predicting areas susceptible to such processes. The thematic data were developed and adapted to a 1:10,000 scale using orthophotomaps at a 1:1,000 scale and the Digital Terrain Model (DTM), generated through aerophotogrammetric survey and Light Detection and Ranging (LIDAR), respectively. It was observed that predominant landslides in the area exhibit a translational rupture surface parallel to the slope, commonly triggered by rainfall and/or wastewater. The model analyzed conditioning factors such as lithology, soils, land use and cover, slope, and slope curvature, which were cross-referenced with a landslide inventory represented as point data located on the rupture surface. The spatial unit used was the grid cell (pixel). The IE was employed to determine the weight of

each conditioning factor class, basic Accountability and Reliability indices, as well as factor weights (Wf). These provided the degree of contribution of each conditioning factor to landslides and supported the filling of the AHP pairwise comparison matrix. The research found that land use and cover are the most influential factors in landslide occurrence, followed by slope, soils, curvature, and lithology. The model generated from the integration of the Statistical Index and AHP demonstrated excellent performance with an AUC (Area Under the Curve) of 0.931 (93%) and outstanding performance with an AUC of 0.906 (90%) for landslide susceptibility assessment in the municipality.

Keywords: Statistical Index, Susceptibility, AHP, landslides, GIS

Introdução

Em todo o mundo os deslizamentos podem resultar em transtornos para a população, danos e fatalidades em assentamentos humanos. Entre 2004 e dezembro de 2016, os deslizamentos não-sísmicos foram responsáveis por 55.997 mortes, com destaque para os países asiáticos. Os deslizamentos fatais (37%), deflagrados por chuvas intensas na América Latina, concentraram-se no Brasil (Froude & Petley, 2018). Neste país, predominam os deslizamentos deflagrados por precipitações intensas resultando em fatalidades e danos estruturais (Dias et al., 2021).

No período de 1988 a junho de 2022, o Brasil registrou 4.146 mortes por deslizamentos em 16 estados, com as principais cidades localizadas na região serrana do Rio de Janeiro e municípios das regiões Sul e Sudeste do Brasil. O estado de Pernambuco está entre os 10 estados com maior número de mortes por deslizamentos (350) no referido período. Somente em 2022 Pernambuco teve 122 vítimas fatais. Em todo Brasil destacam-se os anos 2011 (969) e 2022 (443), os quais tiveram vários dias com chuvas extremas (Macedo & Sandre, 2022).

Assim, mesmo em menor dimensão, os estados do Nordeste, especialmente, os municípios localizados na porção leste deste, são comumente afetados por deslizamentos, acarretando danos estruturais e até mesmo óbitos (Listo & Santos, 2023; Gama & Falcão, 2023).

Ao avaliar a ocorrência de deslizamentos no estado de Pernambuco, seus fatores condicionantes e áreas mais atingidas, Xavier et al. (2022), verificaram que 98% dos deslizamentos estudados no estado concentram-se na Região Metropolitana do Recife (RMR) e Zona da Mata Sul, sobretudo nos municípios de Jaboatão dos Guararapes, Recife, Olinda e Ipojuca, com maior frequência nos meses de abril a julho. Este período é considerado o período chuvoso da porção Leste do Nordeste relacionado a atuação da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), no outono, e os Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOLs), principalmente, concentrando sua atuação no outono/inverno (Duarte et al., 2015; Wanderley et al., 2021; Aragão & Duarte, 2023).

Além da atuação das chuvas intensas e aumento da frequência dos eventos extremos, especialmente nos meses de outono no Leste do Nordeste (Wanderley et al., 2021), as ocupações em áreas de risco são um agravante aos impactos provocados pelos desastres nas principais cidades brasileiras, uma vez que 8.270.127 da população do país residem nessas áreas (Instituto Brasileiro de geografia e estatística [BGE], 2018).

O evento extremo de 2022 teve um total de precipitação na cidade do Recife, entre os dias 25 e 30 de maio, de 551mm, 140mm acima da média do mês de maio (Marengo et. al., 2023). A chuva foi mais intensa nos dias 25 e 28 de maio, com 100–200mm e 151–250mm, respectivamente, provocadas pela atuação do Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOL), deixando vários municípios da RMR em situação de emergência, inclusive Ipojuca. Este desastre evidenciou problemas estruturais e vulnerabilidades que foram delineados ao longo da histórica ocupação dos municípios da RMR moldada pelo cultivo de cana-de-açúcar e suas relações de classe e cultura.

Os mapeamentos de suscetibilidade surgem como forma de mitigar esses impactos por meio da predição dos locais onde novos deslizamentos podem ocorrer. Funciona, portanto, como uma ação não estrutural voltada a redução de risco de desastre (RRD). Visam fornecer às autoridades, tomadores de decisão, defesas civis e sociedade civil subsídios para elaboração de políticas públicas, planos diretores e demais medidas apropriadas para a prevenção, redução e mitigação do risco, conforme afirma Fell et al. (2008).

À vista disso, a presente pesquisa tem como objetivo analisar a relação entre os deslizamentos e seus fatores condicionantes e mapear a suscetibilidade a deslizamentos, na área de expansão urbana entre os distritos de Ipojuca Sede e Nossa Senhora do Ó, do município de Ipojuca, Pernambuco, utilizando-se o modelo estatístico de análise bivariada, denominado Índice Estatístico (IE), integrado à análise multicritério AHP (Analytic Hierarch Process). Assim como, analisar o desempenho deste modelo na predição das áreas suscetíveis a tais processos.

Um dos motivos para escolha do município do Ipojuca está relacionado ao elevado número de

moradores em áreas de risco (6.215 habitantes, conforme o censo demográfico de 2010), sobretudo nas encostas dos morros e colinas da cidade (IBGE, 2018) e todo o acelerado processo de expansão urbana e inúmeras ocupações espontâneas que podem estar intensificando a ocorrência de deslizamentos na área. Ademais, esse município foi contemplado para a elaboração da carta geotécnica de aptidão à urbanização frente a desastres naturais em Termo de Cooperação técnica firmado pelo Ministério das Cidades e Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), através do Grupo de Engenharia Geotécnica de Encostas, Planícies e Desastres (GEGEP), tendo como uma das etapas a elaboração de cartas de suscetibilidade a deslizamento e erosão.

Modelos de suscetibilidade a deslizamentos

A elaboração do mapa de suscetibilidade a deslizamentos é uma etapa fundamental para as ações de RRD. Entende-se como suscetibilidade a probabilidade espacial de ocorrência do deslizamento em uma unidade de terreno, baseada nas suas condições naturais (Rossi & Reichenbach, 2016). Assim, a análise da suscetibilidade parte do princípio de que novos deslizamentos ocorrerão nas mesmas condições que ocorreram no passado e pode ser usado para prever a localização de novos deslizamentos (Guzzetti, 2005). Ou seja, deve indicar as áreas com maior ou menor predisposição a ocorrência desses processos de acordo com o grau de suscetibilidade (Rosa et al., 2021; Rossi et al., 2022).

A escolha do modelo de análise da suscetibilidade a deslizamentos, bem como dos fatores condicionantes a serem considerados dependem da escala trabalhada, do tipo de deslizamento analisado, da unidade de mapeamento e da qualidade e disponibilidade do inventário e dos dados temáticos (Rossi & Reichenbach, 2016; Dias et al., 2021).

São inúmeros os modelos de suscetibilidade trabalhados atualmente, que podem ser divididos primeiramente em qualitativos e quantitativos. Os primeiros, de caráter subjetivo, se baseiam no conhecimento da área de estudo por especialistas, com os graus de suscetibilidade das classes dos fatores condicionantes determinados diretamente no campo ou indiretamente por contribuição de diferentes mapas de índices ou parâmetros (Aleotti & Chowdhury, 1999; Guzzetti, 2005; Pardeshi et al., 2013). Os métodos quantitativos, por sua vez, dividem-se em análise estatística (bivariada e multivariada) e métodos determinísticos (Aleotti & Chowdhury, 1999). Os métodos quantitativos são baseado em dados (data

based), são mais objetivos, e produzem estimativas numéricas, ou seja, calculam a probabilidade de ocorrência de deslizamentos em uma determinada área (Guzzetti et al., 2006; Reichenbach et al., 2018; Dias et al., 2021a; Rosa et al., 2021).

Além dos diferentes modelos, devem ser considerados os fatores condicionantes e deflagradores de deslizamentos que melhor representem os deslizamentos na área de estudo. Existem uma série de fatores físicos que levam a ruptura do talude, os quais são denominados como fatores condicionantes ou fatores predisponentes, que podem ser geológicas, morfológicas (ou geomorfológicas), físicas e humanas. No entanto, para que o deslizamento efetivamente ocorra ele pode ser deflagrado por um desses três fatores: precipitação, sismicidade ou ação humana (Cruden & Varnes, 1996).

Diversos fatores geoambientais são utilizados para modelar a suscetibilidade a deslizamentos, em ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG) (Zhu et al., 2014; Zhang et al., 2016; Reichenbach et al., 2018; Dias et al., 2021; Rosa et al., 2021; Rossi et al., 2022), que incluem tanto os fatores predisponentes quanto os deflagradores. Diferentes tipos de deslizamentos possuem diferentes fatores condicionantes associados, assim como as técnicas para mitigar os danos provocados por eles dependem de sua tipologia. Do mesmo modo, para a avaliação da suscetibilidade a deslizamento, deve-se definir a priori os tipos de deslizamentos identificados na área de estudo e analisá-los separadamente (Zêzere, 2002; Zêzere et al., 2017).

Os métodos estatísticos de análise da suscetibilidade estão sendo bastante utilizados e apresentados na literatura internacional, no entanto, concentram-se em países da Ásia e Europa, dada a existência de extensas cadeias de montanhas nestes continentes (Reichenbach et al., 2018). No Brasil, esses métodos ainda são muito pouco trabalhados. Os trabalhos identificados concentram-se nas regiões Sul e Sudeste, também atrelado a existência das Serras do Mar e Mantiqueira (Dias et al., 2021). Outro fator importante é que prevalecem os modelos estatísticos de análise bivariada, como o Valor Informativo (Dias et al., 2021; Rosa et al., 2021; Gama & Falcão, 2023) também conhecido como Índice Estatístico. No Nordeste e na Região Metropolitana do Recife ainda prevalecem os métodos determinísticos (Listo & Santos, 2023).

O Índice Estatístico (IE) (Van Westen, 1993 e 1997; Berhane & Tadesse, 2021; Rai et al., 2022) ou Valor Informativo (Zêzere, 2002; Tating & Hack, 2015; Myrionidis et al., 2016; Yan et al.,

2019; Pasang & Kubíček, 2020; Rosa et al., 2021; Gama & Falcão, 2023) é uma abordagem de fácil compreensão, usada para identificar a relação entre os fatores condicionantes e a distribuição dos deslizamentos, bem como definir a influência das classes dos fatores trabalhados. É bastante utilizada em estudos de grandes áreas e/ou com dados limitados (Zhang et al., 2016).

Um outro método bastante utilizado no zoneamento da suscetibilidade é a Análise de Processo Hierárquico (AHP - Analytic Hierarch Process), o qual é um método quali-quantitativo na definição dos pesos e relações da matriz de comparação pareada entre os fatores condicionantes, podendo ser usado sozinho, de forma mais qualitativa ou associado a outro método na definição menos subjetiva dos graus de importância entre os fatores condicionantes na ocorrência de deslizamentos (Torres et al., 2015; Yan et al., 2019; Panchal & Shrivastava, 2021; Berhane & Tadesse, 2021).

No presente artigo, optou-se por trabalhar com o índice estatístico associado a AHP. Os dados do inventário de cicatrizes foram gerados a partir da ortofoto do ano de 2013 (Pernambuco, 2016), haja vista, a necessária qualidade do inventário e das variáveis geoambientais utilizadas para melhorar a capacidade preditiva do modelo de suscetibilidade (Reichenbach et al., 2018).

Material e métodos

Localização e caracterização da área de estudo

O recorte espacial para aplicação do modelo de suscetibilidade abrange uma área de expansão urbana entre os distritos de Ipojuca Sede e Nossa Senhora do Ó, incluindo os núcleos urbanos destes distritos, totalizando uma área de 70km². Localiza-se na porção nordeste do município do Ipojuca (Figura 1), o qual faz parte da região metropolitana do Recife (RMR), no Estado de Pernambuco. O município possui uma população de 80.637 habitantes (IBGE, 2010) e uma taxa de urbanização de 74,06%. A população está concentrada em pequenos núcleos urbanos representando os distritos de Ipojuca Sede, Nossa Senhora do Ó e Camela, bem como os núcleos urbanos localizados na porção litorânea.

A concentração dessa população em pequenas áreas é decorrente de uma extensa área do município destinada ao cultivo de cana-de-açúcar e terrenos particulares pertencentes às usinas de açúcar. As periferias desses distritos caracterizam-se por ocupações espontâneas, sem ordenamento territorial e infraestrutura urbana, denominadas de assentamentos informais. Tem-se como outros exemplos de localidades com tais características, as comunidades de Rurópolis e Bela Vista, também pertencentes a área de estudo.

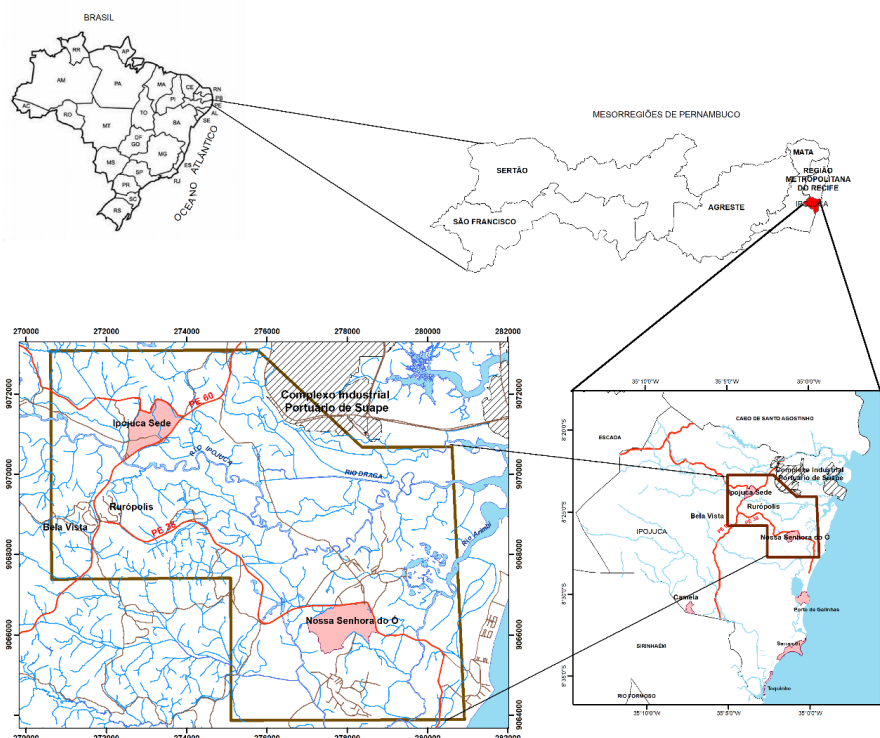


Figura 1. Localização da área de estudo (área de expansão urbana entre os distritos de Ipojuca Sede e Nossa Senhora do Ó), município do Ipojuca, Pernambuco, Brasil.

A área de expansão urbana, recorte espacial dessa pesquisa, abrange as diversas características físicas existente em todo município do Ipojuca. A chuva atua como principal agente deflagrador dos deslizamentos na área. É bem

distribuída ao longo do ano, porém concentra-se nos meses de maio a julho (Figura 2), em torno de 50% do total anual (Wanderley et al., 2021; Aragão & Duarte, 2023), caracterizando um clima Tropical Úmido, com chuvas de outono-inverno.

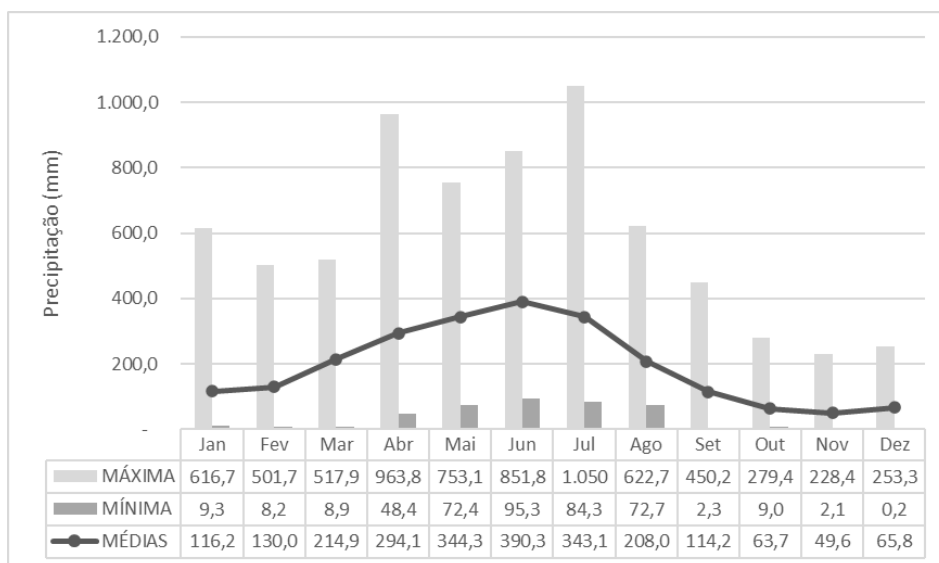


Figura 2. Distribuição mensal da chuva média, máxima e mínima para o município do Ipojuca no período de 1941 a 2013. Fonte: Adaptação dos dados fornecidos pela Usina Ipojuca.

A concentração da chuva nesses três meses intensifica a ocorrência dos deslizamentos, principalmente, quando há chuvas extremas, sendo estes agravados pelos fatores predisponentes, uso e cobertura da terra, geológicos e geomorfológicos (Duarte et al., 2015). Na porção oeste da área predominam as rochas do embasamento cristalino (Gnaisses, migmatitos e granitos), originando colinas com topos arredondados, com declividades bastante acentuadas e vales que podem ser encaixados ou côncavos.

Os solos na porção oeste são bastante espessos, mais silto-argilosos quando originados de rochas graníticas e muito argilosos, nas áreas de solos originados por gnaisses e migmatitos. Na porção leste as rochas sedimentares que compõem as Formações Cabo, Estiva, Algodoads e Barreiras, originam colinas com topos arredondados e vales abertos, com solos areno-argilosos. Outros sedimentos de origem fluvial, fluviomarina, fluviolagunar surgem no extremo leste da área de estudo, com relevo mais plano a suave ondulado. (Coutinho, 2014).

Na porção leste da área de estudo são mais representativas as Formações Cabo (Kc) e Algodoads (Ka). A Formação Cabo (Kc) é suportada por blocos, oriundos do embasamento cristalino e matriz arcoseana (arenito com mais de 25% de feldspato) avermelhada. Tem baixa coesão e alta permeabilidade, facilitando a percolação da

água e levando a desestabilização da rocha e, consequentemente, maior suscetibilidade a deslizamentos. A Formação Algodoads (Ka) é constituída por um conglomerado polimítico (blocos oriundos de diferentes tipos de rochas vulcânicas) sustentado por uma matriz arcoseana amarelada, granulação média e com seixos subangulosos a subarredondados, levando ao surgimento de argilas de alta atividade (Coutinho, 2014). Uma descrição mais detalhada da relação entre as características físicas e a ocorrência de deslizamentos pode ser visualizada nos resultados.

Metodologia

A avaliação da suscetibilidade a deslizamentos na área de estudo ocorreu por meio da aplicação do método quantitativo de abordagem estatística de análise bivariada denominado de Índice Estatístico (IE) e posterior aplicação da AHP. Deste modo, os procedimentos metodológicos foram organizados em três etapas principais: i) Coleta de dados (campo e escritório); ii) Análise e processamento dos dados, com a elaboração dos mapas temáticos; e iii) Aplicação do modelo de suscetibilidade. Esta última foi subdividida em: a) Aplicação do Índice Estatístico e ponderação das classes dos fatores condicionantes; b) Determinação do grau de influência dos fatores condicionantes; c) Aplicação da AHP; d) Cálculo do Índice de Suscetibilidade a

deslizamentos e definição das classes de suscetibilidade; e e) Validação do modelo (Figura 3).

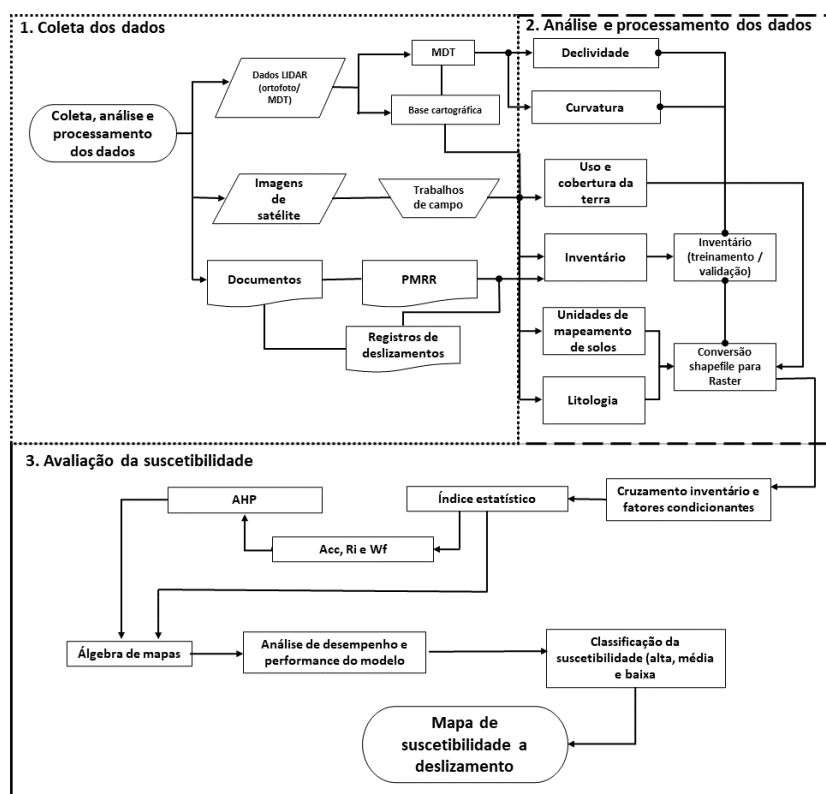


Figura 3. Fluxograma com etapas para a elaboração da carta de suscetibilidade a movimentos de massa do município do Ipojuca.

Coleta de dados

O modelo de suscetibilidade a deslizamentos na área de estudo será aplicado na escala 1:10.000, tendo como base para elaboração e adaptação dos dados temáticos (fatores condicionantes e inventário), as fotografias digitais de alta resolução (ortofotocartas na escala 1:1.000) e o MDT (Modelo Digital do Terreno), de 1 metro de resolução, gerados por recobrimento aerofotogramétrico e LIDAR (Light Detection and Ranging), respectivamente. Os quais foram fornecidos pelo projeto Pernambuco Tridimensional (PE3D) do Governo do Estado de Pernambuco / Secretaria e Desenvolvimento Econômico (Pernambuco, 2016).

Esses dados formaram as bases para elaboração dos parâmetros topográficos e morfométricos (declividade e curvatura) e elaboração dos mapas de unidades litológicas, unidades de mapeamento de solos e uso e cobertura da terra. Toda a base obtida e/ou elaborada encontra-se no Datum Geodésico SIRGAS 2000 e no Sistema Universal Transversa de Mercator (UTM), Fuso 25 / Sul, que será a referência utilizada no mapeamento da suscetibilidade, com

escala compatível a 1:10.000 e resolução espacial de 2,5 metros.

Foram considerados como dados temáticos os mapas dos fatores condicionantes (declividade, curvatura de vertente, litologia, solos e uso e cobertura da terra). Desta forma, o detalhamento dos dados coletados e suas respectivas fontes será apresentado nos procedimentos metodológicos para elaboração de cada mapa temático a seguir.

Análise e processamento dos dados: elaboração dos mapas temáticos

Inventário de cicatrizes: Antes de iniciar a elaboração do inventário de cicatrizes de deslizamentos, foram identificados os tipos de deslizamentos existentes na área de estudo, com base na classificação de Cruden e Varnes (1996) e atualizada por Hungr et al. (2014). Verificou-se, portanto, que na área de estudo, em sua maioria, a superfície de ruptura dos deslizamentos é translacional, paralela ao talude.

Assim, após a etapa de campo, iniciou-se a etapa em gabinete com a obtenção de documentos existentes como o Plano Municipal de Redução de Riscos e registros de deslizamentos fornecidos pela

Defesa Civil municipal; e com a identificação e mapeamento das cicatrizes dos deslizamentos translacionais a partir de imagens de satélite Quickbird Multispectral (2005/2006) e Pancromática (2010) nas escalas 1:10.000, e imagens do Google Earth Pro (2013, 2014 e 2015). O mapeamento das cicatrizes considerando diferentes anos foi validado com fotointerpretação das ortofotos, na escala 1:1.000 de 2013 do projeto PE3D. Como a área apresentava um acelerado processo de expansão urbana dada a ampliação do Complexo Industrial e Portuário de Suape, não foram analisadas as colinas que passaram por terraplanagem antes ou durante 2014, período de realização do aerolevantamento do PE3D; sabe-se que o MDT, foi obtido concomitantemente com a ortofoto.

Foram mapeados 43 deslizamentos translacionais rasos de pequena dimensão, optando-se pela representação pontual, localizado no topo da ruptura dos deslizamentos. Ao final fez-se uma seleção aleatória em que 22 deslizamentos foram usados no modelo (treinamento) e os outros 21, na validação.

Unidades litoestratigráficas (Litologia): para a construção desse mapa utilizou-se como base inicial o mapa geológico, na escala 1:100.000 fornecido pelo Serviço Geológico do Brasil (Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais [SGB/CPRM], 1996). A equipe técnica do Grupo de Engenharia Geotécnica, encostas planícies e desastres (Gegep) por meio de técnicas de fotointerpretação para a identificação de lineamentos, trabalhos de campo e considerando as ortofotos e o MDT de alta resolução gerado por LIDAR (PE3D), delimitou as unidades litoestratigráficas com melhor resolução. Foram obtidos pontos em campo com densidade compatível a escala 1:10.000. Trabalhou-se com as seguintes unidades: Formação Algodoads (Ka), Formação Cabo (Kc), Suíte Magmática Ipojuca – Ignimbrito (Kiig), Suíte Magmática Ipojuca – Riolito (Kirl), Suíte Magmática Ipojuca – Traquito (Kitq), Biotita-granito (Ny3), Quartzo Sienito (Ny5), Complexo Gnáissico-migmatítico (Px), Areias aluviais (Qal), Sedimentos flúvio-lacustres (Qdfl), Sedimentos sílico argilosos de mangue (Qm), Sedimento de praia (Qp), Terraços marinhos holocênicos (Qth), Terraços marinhos pleistocênicos (Qtp).

Declividade: é definida como um plano tangente à superfície, que corresponde à inclinação do terreno em relação à horizontal, expresso como mudança de elevação sobre certa distância (Burrough, 1991). Foi extraída por meio da ferramenta *slope* no ArcGIS 10.3®, com licença

disponível no GEGEP/UFPE, com intervalos relacionados com a inclinação da encosta em graus (°). Utilizando o método quebra natural que melhor representou as declividades existentes na área de estudo, dividiu-se os intervalos de declividade em sete classes: 0-3°, 3°-7°, 7°-11°, 11°-17°, 17°-27°, 27°-45°, >45°.

Curvatura da encosta: esse parâmetro topográfico torna-se uma variável indireta do modo como os fluxos de água se distribuirão ao longo da encosta (Listo & Santos, 2023). De modo simplificado, as formas da vertente podem se dividir em três: i) curvatura vertical: expressa a forma da vertente na direção da sua maior inclinação. Afeta a aceleração e desaceleração do fluxo sobre a superfície; ii) curvatura horizontal: indica a forma da vertente em termos laterais, ou seja, a forma da vertente em orientação perpendicular à do perfil longitudinal, expressando as alterações da exposição da vertente; e iii) curvatura total: é o resultado da combinação das anteriores.

Utilizou-se, portanto, a curvatura total. Considerando os extremos de máxima concentração e máxima dispersão foram divididas em três classes: côncava/convergente (valores negativos); convexa/divergente (valores positivos) e o intervalo -0,5 e 0,5 retilínea/planar. Tais parâmetros foram obtidos por meio da ferramenta *Curvature* do software ArcGIS 10.3® que utiliza como base as metodologias propostas por Moore e Grayson (1991) e Zevenbergen e Thorne (1987).

Apesar de levarmos em conta o problema quanto às faces de triangulação com o aumento da resolução (Garcia, 2012), optou-se por trabalhar com o pixel de resolução de 5 metros, uma vez que apresentou bons resultados após a aplicação de técnicas de generalização.

Unidades de mapeamento de solos: devido a inexistência de mapas pedológicos municipais nas escalas 1:25.000 ou maiores, fez-se uso das unidades de mapeamento de solos, as quais consistem em associações de solos, da EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) na escala 1:100.000. Entretanto, para atingir uma representação compatível a escala 1:10.000 foram realizados trabalhos de campo, com o reconhecimento morfológico de solos, seguindo-se os parâmetros recomendados pelo Manual de descrição e coleta de solos em campo de Santos et al (2015). Também foram obtidos dados de sondagens preexistentes e perfis de solo, para classificação *in loco*, da área de estudo para complementar as informações. Ressalta-se que o mapa final elaborado não consiste em um mapa pedológico propriamente dito, pois seria necessária

uma maior distribuição de pontos para análise morfológica do perfil, bem como análises químicas em laboratório. Foram definidas as seguintes unidades de mapeamento de solos: AM (Areias quartzosas marinhas e Espodossolo), AQ1 (Areias Quartzosas), G1 (Gleissolo, Cambissolo, Solos Aluviais e Argissolos Amarelos e Acinzentados), G2 (Gleissolo, Cambissolo e Solos Aluviais), G5 (Gleissolo e Espodossolo), HP1 (Espodossolo), LA9 (Latossolo Amarelo, Argissolo Amarelo, Vermelho-Amarelo, Gleissolo e Cambissolo), PA_4 (Argissolo Amarelo e Vermelho Amarelo, Argissolo Vermelho-Amarelo), PV2 (Argissolo Vermelho-Amarelo e Cambissolo), PV3 (Argissolo Vermelho-Amarelo, Cambissolo e Solos Litólicos), SM (Solos de Mangue).

Uso e cobertura da terra: para a produção do mapa procedeu-se à interpretação e vetorização das Ortofotos fornecidas pelo projeto PE3D. Também foram obtidos, em trabalhos de campo, pontos de controle para validação do mapa de uso. A definição das classes baseou-se nas unidades do Manual técnico de uso da terra do IBGE (2013), e realizadas por meio de técnicas de fotointerpretação, atendendo a quarta classe de uso e com algumas adaptações a realidade do município para atender ao objetivo do trabalho, propondo-se, assim, uma nova classificação. Utilizou-se na modelagem de suscetibilidade as 22 classes referente ao quarto nível, a saber: assentamentos informais, cana-de-açúcar, áreas urbanizadas, complexo industrial, coqueiral, corpos d'água, horticultura, cultivos diversificados, estabelecimento de pesquisa e educação, estradas, extração de argila, residências isoladas, manguezal, floresta arbórea, floresta arbustiva, solo exposto para construção, solo exposto por erosão, usina de cana-de-açúcar, vegetação rasteira, vegetação herbácea, áreas comerciais e alagados.

Aplicação do índice estatístico e ponderação das classes dos fatores condicionantes

O método índice estatístico (van Westen, 1993) ou Valor Informativo (Zêzere, 2002) consiste em um método estatístico de análise bivariada, ou seja, se baseia na distribuição dos deslizamentos para cada classe de cada fator condicionante. Sustenta-se na transformação logarítmica da razão entre a probabilidade condicionada e probabilidade *a priori*, representado pela seguinte equação:

$$S_i = \ln \left(\frac{Dens_{class}}{Dens_{map}} \right) = \ln \left[\left(\frac{N(L_i)}{A_i} \right) / \left(\frac{\sum N(L_i)}{\sum A_i} \right) \right] \quad (1)$$

Em que S_i é o peso de uma determinada classe de um fator condicionante; $Dens_{class}$ é a densidade de deslizamentos existentes nessa classe; $Dens_{map}$ é a densidade de deslizamentos para toda a área estudada. Como a unidade de mapeamento escolhida é a célula de grade, então $N(L_i)$ refere-se ao número de pixels ocupados por deslizamentos na classe em questão, A_i é o número de pixels desta classe, $\sum N(L_i)$ é o número total de pixels com deslizamento em toda a área de estudo e $\sum A_i$ é o número de pixels de toda a área de estudo.

Para aplicação desse método todos os dados foram transformados em *raster*, com células (pixels) de 2,5 metros. Em seguida os mapas temáticos foram cruzados com o inventário utilizando-se a ferramenta Tabular Área do *Spatial Analyst* do ArcGIS 10.3®. Tal ferramenta resulta em uma tabela com a área ocupada por deslizamentos para cada classe do parâmetro analisado e posteriormente transformado em quantidade de pixels.

Quando o valor de S_i for negativo considera-se que a classe de um respectivo fator condicionante não é determinante no desenvolvimento de um deslizamento. Por sua vez, os resultados positivos indicam uma relação entre uma determinada classe e a ocorrência de um deslizamento que será mais acentuada quanto maior for o valor do índice estatístico (Guillard & Zêzere, 2012; Zêzere et al., 2017; Barella et al., 2019).

Determinação do peso dos fatores condicionantes

Foram utilizados três métodos básicos para estimar a contribuição de cada fator condicionante no desenvolvimento dos deslizamentos: o índice de responsabilidade (accountability - A_i), o índice de confiabilidade (reliability - R_i), introduzidos por Greenbaum et al. (1995a,b), e o fator de peso (weight fator - W_i), apresentado por Yalcin (2008), como forma de verificar quais as melhores combinações de fatores condicionantes podem ser usadas para melhorar a performance dos modelos de suscetibilidade (Catellanos Abella, 2008, Blahut et al., 2010; Melo & Zêzere, 2017; Rosa et al., 2021). Os referidos métodos foram aplicados após a obtenção do índice estatístico para cada classe dos fatores condicionantes.

O índice de responsabilidade (A_i) contabiliza o quanto as diferentes classes dos fatores condicionantes são relevantes na análise, com base nas cicatrizes de deslizamentos nelas contidas. Por sua vez, o índice de confiabilidade (R_i) baseia-se na densidade média de deslizamentos nas classes dos fatores para definir sua relevância

(Rosa et al., 2021). Os dois métodos promovem diferentes, mas relevantes resultados para a predição da suscetibilidade, porém o índice de confiabilidade é o mais utilizado (Blahut et al., 2010). Estes índices podem ser gerados com base nas seguintes equações:

$$A_i = 100 * \sum_{i=1}^n \frac{k}{N} \quad (2)$$

$$R = 100 * \frac{\sum_{i=1}^n k}{\sum_{i=1}^n y} \quad (3)$$

Em que k é a área ocupada por deslizamentos dentro da classe dos fatores com S_i maior que 1. N é a área total de deslizamentos da área de estudo. y é a área de cada classe dos fatores que obtiveram um S_i maior que 1.

O fator de peso (W_f) consiste no somatório dos valores de S_i gerado para cada fator condicionante e usando-se os valores máximos e mínimos de todos eles, a ponderação dos fatores de 1 a 100, é determinada pela seguinte fórmula (Yalcin, 2008):

$$W_f = \frac{(TSi) - (MinTSi)}{(MaxTSi) - (MinTSi)} * 100 \quad (4)$$

Em que, W_f é o peso calculado para cada fator condicionante; TSi é o somatório dos valores de S_i das classes com deslizamento para cada camada; $MinTSi$ é o TSi mínimo dos fatores condicionantes trabalhados; $MaxTSi$ é o TSi máximo dos fatores condicionantes trabalhados.

Aplicação da AHP

Dando continuidade à ponderação dos fatores condicionantes aplicou-se a AHP (Analytical Hierarchy Process) desenvolvida por Saaty (1987), a qual é uma ferramenta de auxílio à tomada de decisão baseada na lógica de comparação pareada e permite estimar um peso relacionado a contribuição relativa de cada um dos fatores estimados anteriormente. Os diferentes fatores condicionantes usados como dados de entrada no modelo foram comparados dois a dois; e um critério de importância relativa referente à suscetibilidade a deslizamentos foi atribuído ao relacionamento entre esses fatores, conforme uma escala predefinida por Saaty (1987) apresentada na Tabela 1.

As comparações entre os parâmetros são registradas em matrizes na forma de frações 1/9 e 9. Cada matriz é avaliada pelo seu autovalor para verificar a consistência dos julgamentos. Esse julgamento gera uma razão de consistência (Consistency Ratio – CR) que deve ser menor que 0,10, ou seja, quando o valor encontrado for inferior a 0,10, significa que os resultados obtidos são adequados e pode-se dar continuidade ao desenvolvimento do modelo, caso contrário, quando o valor é superior a 0,10 sugere-se uma revisão dos julgamentos.

A definição da importância relativa baseou-se nos resultados encontrados após a ponderação dos fatores com a identificação do W_f . Por conseguinte, os resultados da aplicação da AHP geraram uma nova ponderação (W_i) para cada um dos condicionantes, a qual foi utilizada no modelo de suscetibilidade.

Tabela 1. Escala da importância relativa aplicada pela AHP para a comparação pareada

Importância	Definição	Explicação
1	Igual importância	A contribuição dos atributos é igual
3	Moderada importância	O atributo é ligeiramente mais importante do que o outro
5	Forte importância	O atributo é fortemente mais importante do que o outro
7	Muito forte importância	O atributo é muito fortemente mais importante do que o outro
9	Extrema importância	O atributo é extremamente mais importante do que o outro
2, 4, 6, 8	Valores intermediários dos julgamentos	O atributo está entre uma importância e outra

Fonte: Adaptado de Saaty (1987).

Cálculo do Índice de Suscetibilidade a deslizamentos e definição das classes de suscetibilidade

O índice de suscetibilidade a deslizamentos (ISD) foi calculado a partir do

somatório dos escores de S_i identificados para as classes dos fatores condicionantes e multiplicados pelos seus respectivos pesos W_i :

$$ISD = \sum_{i=1}^n S_i * W_i$$

As classes de suscetibilidade foram definidas com base no gráfico de densidade de deslizamentos, utilizando o inventário de deslizamentos separados para o modelo, em que 5% dos deslizamentos estavam na classe baixa, 15% na média e 80% na alta.

Validação do modelo

O grau de ajuste (taxa de sucesso) e a validação (taxa de predição) do modelo ocorreram a partir do cruzamento entre as classes de suscetibilidade e o inventário separado aleatoriamente para ser utilizado 50% no modelo (treinamento) e 50% na validação (teste) com a identificação da área abaixo da curva (AAC ou AUC – area under curve) da curva ROC (receiver operating curve). Essa métrica é bastante utilizada para identificar a confiabilidade das áreas suscetíveis a deslizamento previstas pelo modelo, sobretudo de abordagem estatística (Vakhshoori e Zare, 2018). A curva ROC é gerada a partir da combinação do índice de suscetibilidade a deslizamentos com as taxas de falso positivo (FPR) no eixo X (especificidade), que corresponde a probabilidade de uma célula sem deslizamento ser classificada corretamente, e uma taxa de verdadeiros positivos no eixo Y (sensibilidade), referente a probabilidade de uma célula com deslizamento ser classificada corretamente. Quanto mais íngreme for a curva, melhor é a capacidade do modelo para descrever a distribuição dos deslizamentos (Chung & Fabbri, 2003; Corominas et al, 2014). A Área Abaixo da Curva (AAC) é calculada de acordo com a seguinte equação (Vakhshoori & Zare, 2018):

$$AUC = \sum_{i=1}^{n+1} \frac{1}{2} \sqrt{(x_1 - x_{i+1})^2 * (y_i + y_{i+1})}$$

Em que $(y_i - y_{i+1})$ é a amplitude de classe do eixo das abscissas (altura do trapézio) e $(x_i + x_{i+1})$ referem-se aos valores das ordenadas (base do trapézio).

Para classificar a precisão do modelo trabalhado a partir da AAC das curvas ROC, os valores variam de 0,50 a 0,60 (reprovado), 0,60 a

0,70 (ruim), 0,70 a 0,80 (regular), 0,80 a 0,90 (bom) e 0,90 a 1 (excelente) (Rasyid et al., 2016).

Resultados e discussão

Após o cruzamento dos fatores condicionantes com o inventário de cicatrizes de deslizamentos e posterior aplicação do Índice Estatístico e integração com a AHP, os resultados e discussão destes foram organizados na seguinte forma: i) distribuição espacial e definição do grau de influência que cada classe dos fatores condicionantes exerce sobre os deslizamentos; ii) definição do peso do fator condicionante e atribuição da importância relativa na matriz de comparação pareada da AHP; iii) definição das classes de suscetibilidade do modelo gerado; e iv) validação do modelo.

Distribuição espacial e definição do grau de influência das classes dos fatores condicionantes

Analisando-se as unidades litoestratigráficas presentes no recorte espacial delimitado para aplicação do modelo de suscetibilidade, verificou-se que ele é ocupado em grande parte (47%) por Sedimentos Flúvio-Lacustres (Qdfl), na porção leste da área, seguida de Biotita-Granito (Ny3), com 17%, nas porções sudoeste e noroeste e Formação Cabo (Kc), com 11%, na porção Leste (Tabela 2). Todavia, o cálculo do Índice Estatístico (S_i) demonstrou que a unidade Complexo Gnaissico Migmatítico (Px), a qual abrange boa parte da comunidade de Rurópolis e somente 4% da área total, representa um percentual de 26% dos deslizamentos, o que a leva ao maior valor de S_i encontrado para o fator Litologia ($S_i=1,201$), seguida da Formação Algodoads (Ka) que ocupa somente 1% da área e 7% dos deslizamentos, representando um $S_i=1$ e Biotita-Granito (Ny3) com 17% da área total e representa uma densidade de 63% dos deslizamentos e um valor de $S_i=0,594$ (Tabela 2). As demais classes influenciam negativamente no desenvolvimento dos deslizamentos (Figura 4).

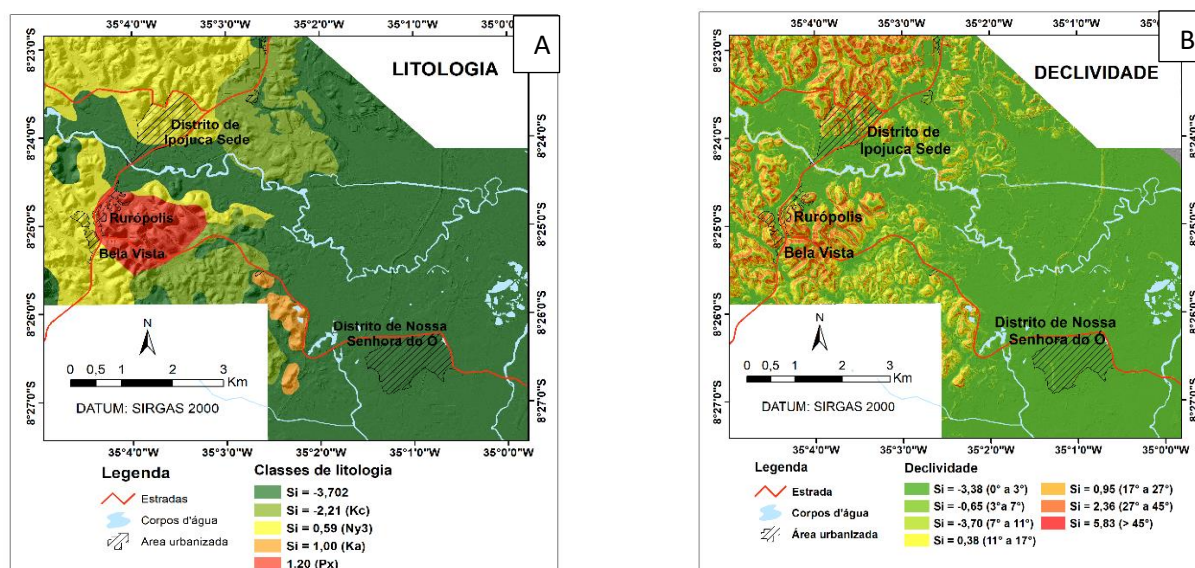


Figura 4. Mapas temáticos representando a litologia (A) e declividade (B) da área de estudo.

A maior suscetibilidade das rochas cristalinas (Px e Ny3) se deve, principalmente, em função dos materiais oriundos da decomposição destas unidades, visto que as rochas estão bastante intemperizadas e cobertas por espessas camadas de solos argilosos e com declividades acentuadas. Ademais as rochas que compõem a unidade Ny3 são isotrópicas (menos descontinuidades existentes) e originam solos silto-argilosos. São ocupadas intensivamente pelo cultivo de cana-de-açúcar, ao passo que os solos originados na unidade Px são mais argilosos e esta unidade possui uma maior quantidade de descontinuidades por conta do bandamento do gnaiss, o que lhe confere uma maior suscetibilidade que a anterior, agravada pela ocupação espontânea na comunidade de Rurópolis. A integração destas características favorece o desprendimento do material das encostas e o deslocamento de blocos. A suscetibilidade a deslizamentos nestas áreas também foi evidenciada por Pfaltzgraff (1998, 2007), Torres et al. (2015) e Xavier et al. (2022), estes últimos destacam as colinas que configuram o Piemonte da Borborema.

A Formação Algodão (conglomerados – seixos vulcânicos) também apresentou uma alta suscetibilidade devido as suas características físicas e pela relação área/deslizamentos. Torres et al. (2015) já alertaram para a alta suscetibilidade destas áreas.

As declividades inferiores a 7° representam 77% da área de estudo, localizadas principalmente na porção leste da área, onde há o predomínio da planície fluvial do Rio Ipojuca, terraços marinhos e acumulações fluviomarinhas e marinhas, com relevo plano a suave ondulado (Figura 4B). Nesta área foram identificados 7% dos

deslizamentos, por estarem no limite das encostas íngremes, vale ressaltar que essas áreas estão suscetíveis a serem atingidas por material transportados das encostas. Por outro lado, as declividades acima de 45° que abrangem em torno de 0,06% da área, apresentaram um percentual de 21% dos deslizamentos e um $S_i = 5,83$, sendo este o intervalo de declividade mais suscetível a ocorrência de deslizamento, na área de estudo. O intervalo entre 27° e 45°, com 4% de área, compreendeu 47% dos deslizamentos, tornando-se o segundo intervalo de declividade mais suscetível ($S_i = 2,36$) e 17° a 27° (6% de área e 16% dos deslizamentos) o terceiro intervalo mais suscetível com um $S_i = 0,95$ (Figura 4B e Tabela 2).

Desta forma, percebe-se que a suscetibilidade cresce com o aumento da declividade. Por outro lado, os deslizamentos são mais frequentes nos intervalos entre 27° e 45°, o que também foi evidenciado nos trabalhos de Myronidis et al. (2016) que destacam as declividades mais significativas nos intervalos entre 30 e 40°; assim como Zêzere et al. (2017) que destacaram as declividades acima de 30°. O intervalo de declividade acima de 45° apresentou uma maior suscetibilidade dada a sua pequena área ocupada por deslizamentos. Porém, os deslizamentos são mais frequentes nos intervalos de 27° a 45° e após 45° tendem a diminuir. Os resultados encontrados por Listo e Santos (2023) e Xavier et al. (2022), corroboram com o que foi identificado no presente artigo.

Em relação a curvatura (Figura 5A), as encostas de forma retilínea/planar, referentes, sobretudo às áreas das planícies e topo de tabuleiros, ocupam 76% da área de estudo e uma

baixa densidade de deslizamentos levando a um índice de suscetibilidade negativo ($S_i = -1,29$). Nas encostas convexas/divergentes, onde predomina a dispersão do fluxo, foram identificadas a mesma densidade de deslizamentos que as encostas Côncavas/convergentes, caracterizadas pela concentração do fluxo (40%), entretanto, esta última representa um menor percentual de área (12%) levando a um índice de suscetibilidade superior a classe anterior ($S_i = 1,14$ e $S_i = 1,22$, respectivamente).

A semelhança entre as duas supracitadas classes pode estar atrelada a alta resolução do MDT, visto que resultados semelhantes foram identificados por Bonini et al. (2020) e Listo e Santos (2023) que também usaram MDT de alta resolução. Devido a isso, alguns autores sugerem diminuir a resolução do MDT para diferenciar melhor as classes e diminuir as faces de triangulação (Garcia, 2012). Todavia, quando aplicado o Índice Estatístico, as curvaturas côncavas/convergentes mostraram-se mais suscetíveis, pois detêm áreas menores na área de estudo, o que está de acordo com a literatura, pois encostas côncavas concentram o escoamento superficial e o fluxo subsuperficial elevando a suscetibilidade (Reichenbach et al., 2018). As altas frequências nas encostas convexas podem estar relacionadas a intensidade das chuvas e o modo de ocupação do terreno, com corte/aterros nestas áreas sem preparo técnico.

As vertentes côncavas/convergentes são as que melhor representam as cabeceiras de drenagem, muito comuns na área de estudo e que são densamente ocupadas e/ou estão em crescimento urbano em direção ao topo de encosta (Figura 6), principalmente onde estão localizados

os assentamentos informais, como por exemplo na ZEIS Rurópolis.

A unidade de mapeamento de solo que apresentou um maior índice estatístico foi a LA9 ($S_i = 1,87$), uma vez que abrange 47% dos deslizamentos em 7% da área total. Essa unidade representa uma associação de Latossolo Amarelo (40%) e Argissolo Vermelho Amarelo laterítico e não laterítico, de textura média e argilosa e muito argilosa (40%) e Gleissolos e Cambissolos (20%), sobre o Complexo Gnaissico Migmatítico e Biotita-granito.

Em seguida tem-se a unidade PV2 ($S_i = 0,973$) com 42% dos deslizamentos em uma área de 16%, prevalecendo os Argissolos Vermelho-Amarelo de textura muito argilosa sobre a Formação Cabo e Biotita-Granito. A unidade PV3, predominando os Argissolos Vermelho-Amarelo, também localizados sobre Biotita Granito, aparece em terceiro, detém 2% dos deslizamentos ocupando somente 1% da área total (Tabela 2, Figura 5B).

Xavier et al. (2021) também identificaram uma maior quantidade de deslizamentos em Latossolos Amarelos, seguidos dos Argissolos Vermelhos e Argissolos Amarelos. Os Latossolos localizam-se em topos planos, favorecendo a infiltração, no entanto, quando saturados rompem-se facilmente. Por sua vez, os Argissolos localizam-se na encosta e possuem horizonte B textural que dificulta a infiltração da água, logo, saturam as camadas superiores do solo, levando a ocorrência de deslizamentos. A suscetibilidade nos Latossolos amarelos intensifica-se com a retirada da vegetação e o modo de ocupação, que alteram a geometria da encosta (Xavier et al., 2022).

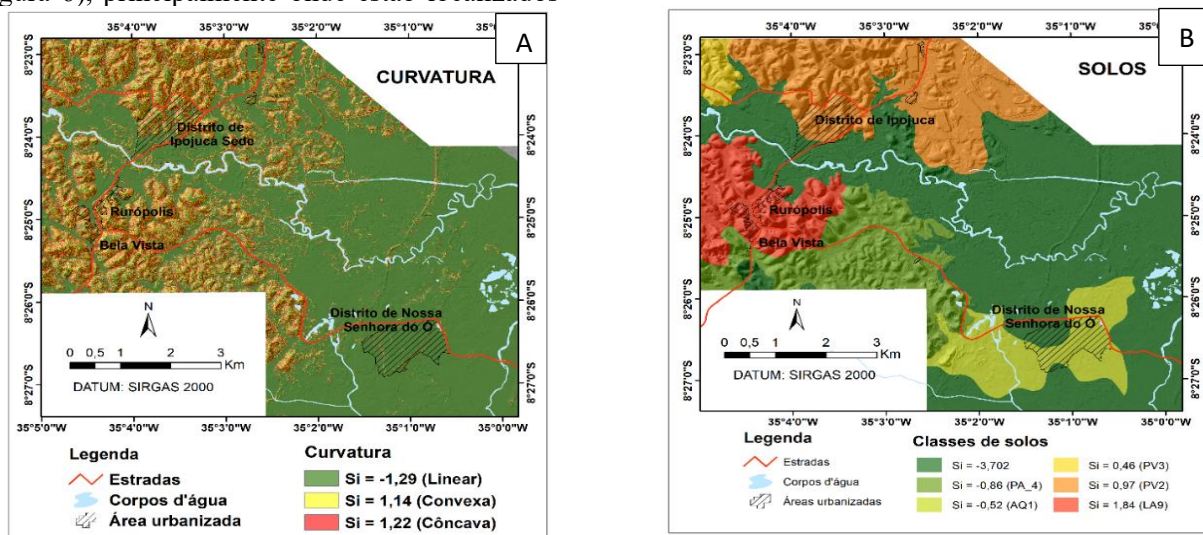


Figura 5. Mapas temáticos representando a curvatura (A) e as unidades de mapeamento de solos (B) da área de estudo).

A definição das classes e detalhamento do tema uso e cobertura da terra difere de muitos artigos de análise da suscetibilidade com aplicação do Índice Estatístico (Yalcin, 2008; Kavzoglu et al., 2015; Zhang et al., 2016; Nicu & Asăndulesei, 2018), haja vista a escala local trabalhada no presente artigo. Foram delimitadas 22 classes de uso e cobertura da terra que atuam de forma diferenciada no desenvolvimento dos deslizamentos de pequena dimensão, como os que ocorrem no município do Ipojuca. Dentre as classes trabalhadas a que apresentou um maior valor de S_i foi a classe denominada de Assentamentos informais ($S_i=3,388$), representada por áreas de ocupação espontânea, sem planejamento e implantação de infraestrutura urbana (asfalto, saneamento, acesso a água encanada etc.), que coincidem com as Zonas Especiais de Interesse Social (ZEIS) definidas pelo Plano Diretor do município do Ipojuca (Figura 7). As áreas de Solo exposto por erosão, cultivos diversificados e áreas urbanizadas, também foram representativas ($S_i=2,976$, $S_i=1,205$ e $S_i=1,281$, respectivamente) (Tabela 2).

Os assentamentos informais exibem, portanto, um controle individual muito maior sobre os deslizamentos, por apresentar uma área relativamente menor, o que acaba por elevar a sua probabilidade condicionada a um valor mais significativo (Barella et al., 2019). Eles são representados pelas comunidades de Bela Vista e Rurópolis, as quais estão localizadas dentro da área de abrangência dessas unidades de mapeamento (Figuras 7A e 7B).

A importância da comunidade de Rurópolis foi apresentada anteriormente por Coutinho et al. (2016), os quais, baseados nos dados de ocorrência de deslizamentos fornecidos pela Defesa Civil do município, verificaram que Rurópolis representa 20% dos deslizamentos de todo município do Ipojuca. Dando continuidade à pesquisa dos referidos autores, foi verificado, no presente artigo, que de 2007 a 2015, as ocorrências por deslizamentos foram mais frequentes (41%) na comunidade de Rurópolis, sobretudo nas ocupações localizadas nas cabeceiras de drenagem (Figura 6) e na periferia dos Distritos de Ipojuca Sede (32%), elevando a suscetibilidade da classe centros urbanos, no último caso.

Outro fator importante é que os deslizamentos se concentram nos meses de abril (18,3%), maio (16,7%) e junho (18,3%), meses considerados mais chuvosos (Figura 2) e de maior frequência de ocorrência de chuvas intensas e extremas (Duarte et al., 2015; Wanderley et al.,

2021; Aragão & Duarte, 2023) ocasionadas, sobretudo pela atuação dos Distúrbios Ondulatórios de Leste.

Ratificando esses condicionantes, estudos realizados por Esteves et al. (2023) apresentam, no município de Ipojuca, declividades de relevo ondulado e forte ondulado, prevalecendo as ocupações espontâneas e cultivos de cana-de-açúcar, que elevam a suscetibilidade a movimentos de massa e escoamento superficial.

Definição do peso dos fatores condicionantes e aplicação da AHP

Os resultados dos índices de responsabilidade (A_i) e de confiabilidade (R_i) e do fator de peso (W_f) foram bastante diferentes, o que era esperado diante dos seus objetivos. O A_i evidenciou os fatores litologia e a declividade como os que mais contribuem no desenvolvimento dos deslizamentos na área de estudo, seguido do fator solo, curvatura e por último o uso e cobertura da terra. Esse resultado demonstra que para o fator geologia as classes mais relevantes compreendem 95% dos deslizamentos, ao passo que o fator uso compreende somente 53%. Por outro lado, o índice de confiabilidade evidenciou a declividade e o uso e cobertura da terra como os fatores que mais contribuem no desenvolvimento dos deslizamentos, o que está mais de acordo com os resultados encontrados após o cálculo do Índice Estatístico (S_i), conforme demonstrado anteriormente. Isso indica que as classes dos fatores mais determinantes apresentam uma quantidade significativa de deslizamentos em uma pequena extensão de área, se comparado a área ocupada por deslizamento em toda a área de estudo.

Esse resultado ainda condiz com a realidade no sentido de que as ações antrópicas no município atuam como agente preparatório do terreno para a ocorrência dos deslizamentos dada a significativa precariedade das ocupações nas áreas de encostas desse município, com a retirada da vegetação, lançamento de águas servidas e esgoto encosta abaixo, vazamento de tubulações, além da realização de aterros e cortes na base dos taludes sem conhecimento prévio de engenharia, inexistência de obras de microdrenagem e ruas asfaltadas (Figura 7). Tal destaque na relação entre o uso e o desencadeamento dos deslizamentos translacionais na RMR foi exposto por Carvalho e Galvão (2006), Bandeira e Coutinho (2015), Xavier et al. (2022) e Listo e Santos (2023).

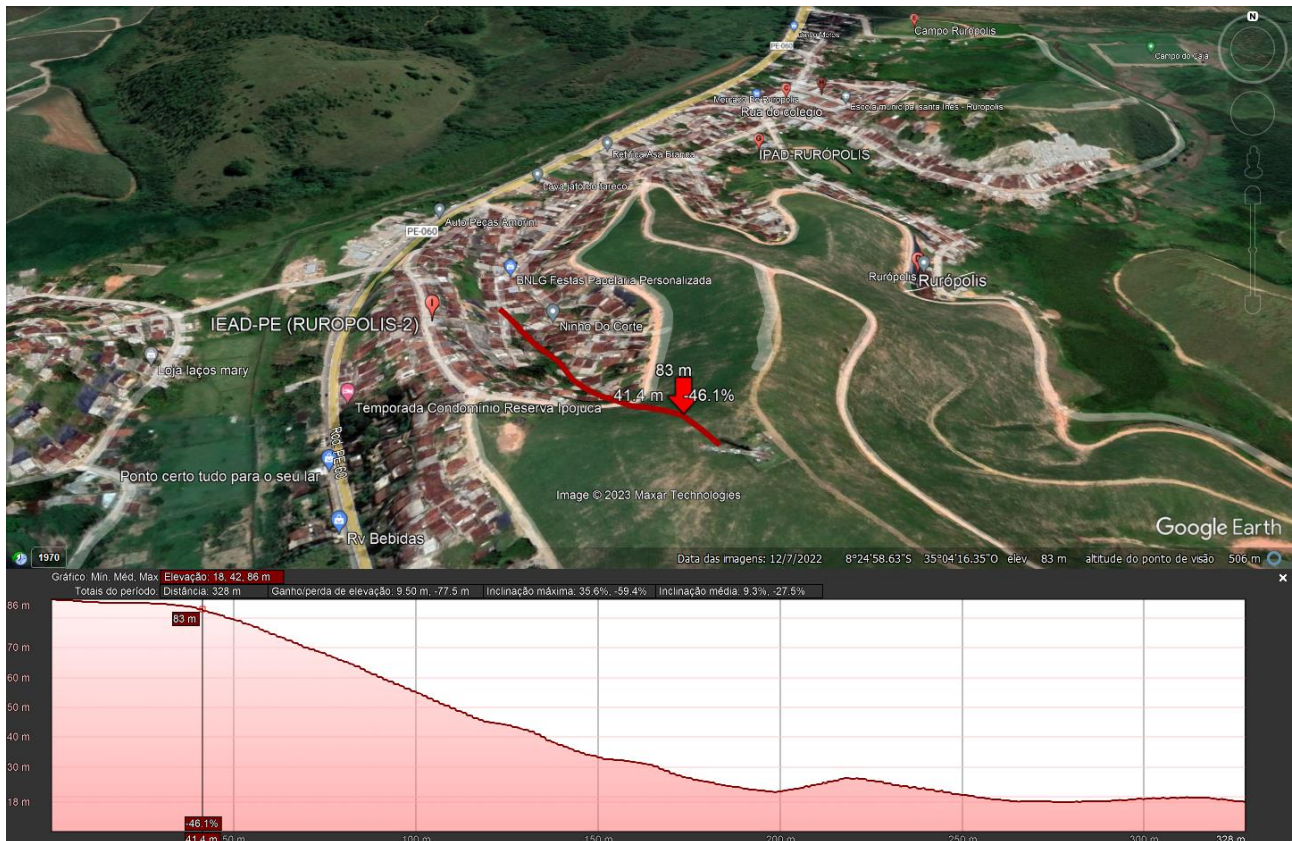


Figura 6. Ocupação desordenada em áreas de cabeceira de drenagem na localidade de Rurópolis, Ipjuca Sede, município do Ipjuca



Figura 7. Formas de ocupação espontânea e exemplos de deslizamentos translacionais nas localidades de Bela Vista (A) e Rurópolis (B). FONTE: GEGEP (2014)

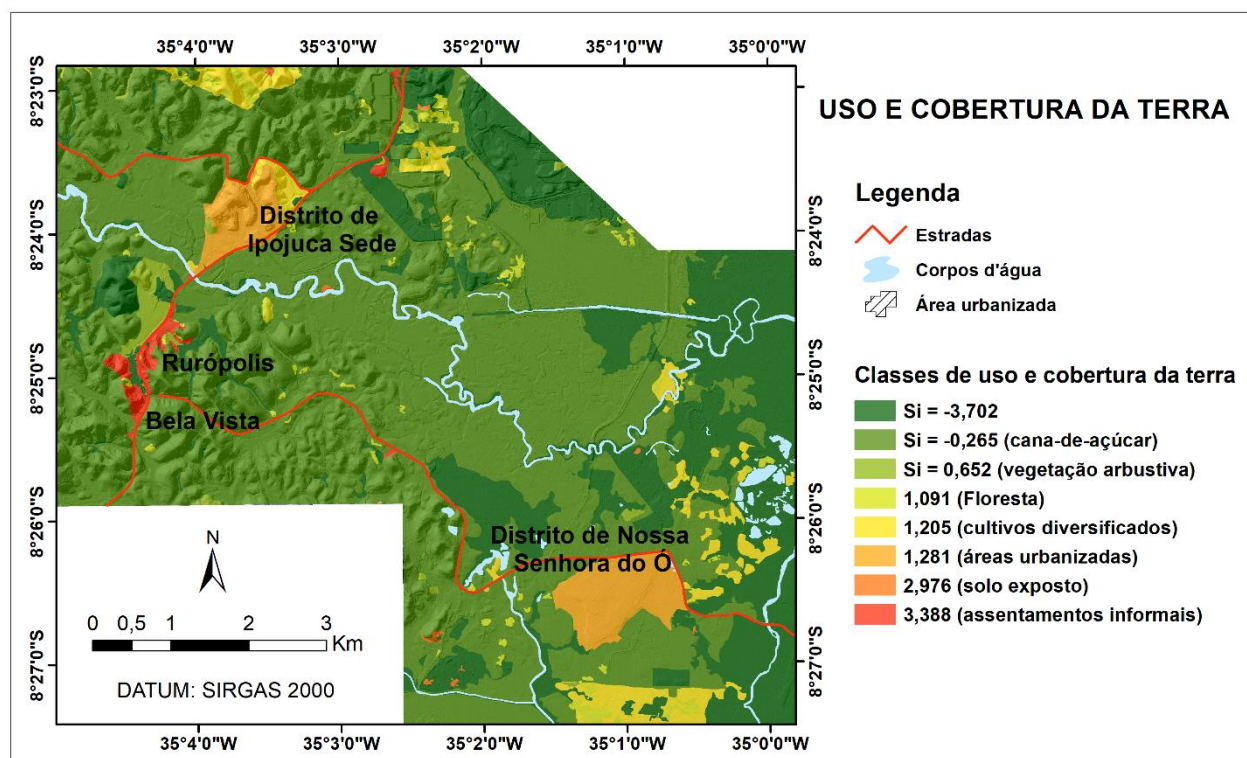


Figura 8. Mapa temático representando o fator uso e cobertura da terra.

Resultados semelhantes também foram encontrados por Mendes et al. (2018) no município de Campos do Jordão, São Paulo. Os autores avaliaram a contribuição relativa de fatores naturais e humanos para desencadear processos de movimentos de massa em encostas ocupadas no município e verificaram que os fatores naturais, isto é, chuva de alta intensidade e condições geotécnicas, não foram severos o suficiente para desencadear deslizamentos na área de estudo e que as ações humanas foram inteiramente responsáveis pelos eventos de deslizamentos.

Portanto, quando considerado no modelo de suscetibilidade, o uso e cobertura da terra torna-se um fator de extrema importância no desenvolvimento dos deslizamentos, uma vez que as atividades antrópicas, crescente urbanização e uso descontrolado da terra em áreas propensas a deslizamentos podem produzir um incremento significativo da ocorrência deste processo, a partir das mudanças na geometria da encosta (Sabatakakis et al., 2013; Myronidis et al., 2016; Zhang et al., 2016; Zêzere et al., 2002; Zêzere et al., 2017; Listo & Santos, 2023), que, no caso do presente estudo, foram melhor evidenciadas pela utilização dos dados LIDAR de alta resolução e corroboradas com os resultados encontrados para a declividade.

De tal modo, comprovou-se, no presente artigo, que a declividade também é determinante no desenvolvimento dos deslizamentos na área de

estudo, e, em outros artigos analisados, provou ser o fator ou um dos fatores predisponentes mais eficiente na modelagem da suscetibilidade (Kavzoglu et al., 2015; Myronidis et al., 2016; Reichenbach et al., 2018; Barella et al., 2019; Rosa et al., 2021).

O cálculo do W_f com base no somatório dos valores de S_i das classes de cada fator condicionante evidenciou uma maior influência do fator “Uso e cobertura da terra” ($W_f=1$) no desenvolvimento dos deslizamentos na área de estudo, determinada pelo maior número de classes desse fator com áreas pequenas e deslizamentos bem distribuídos entre essas classes, elevando as suas probabilidades relativas. O uso vem acompanhado da declividade ($W_f=0,52$), solos ($W_f=0,16$), curvatura ($W_f=0,07$) e por último pela litologia ($W_f=0$).

Diante dos resultados acima apresentados, o índice de confiabilidade foi o que melhor representou a realidade geológica e geomorfológica da área delimitada para o presente estudo, no entanto, os valores de W_f fundamentaram a compreensão da proporção em que um fator é mais importante do que o outro para o preenchimento da matriz de comparação pareada da AHP e definição dos pesos dos fatores condicionantes a serem utilizados no modelo de suscetibilidade (Tabela 3).

Tabela 2. Relação dos fatores condicionantes e o percentual de área, percentual de deslizamentos existentes em cada classe e os resultados do índice estatístico (S_i), Peso associado a cada fator (W_f), peso após a aplicação da AHP (W_i), Accountability (Acc) e Reliability (Ri).

Fatores condicionantes	Classes	% Área da Classe	% Deslizamentos	S_i	Acc	Ri	Wf	Wi
Litologia	Ka	1	7	1.003	95.3	0.0016	0.0	0.04
	Kc	11	2	-2.215				
	Kiig	0	0	-3.702				
	Kirl	1	0	-3.702				
	Kitg	2	0	-3.702				
	Ny3	17	63	0.594				
	Ny5	0	0	-3.702				
	Px	4	26	1.201				
	Qal	7	0	-3.702				
	Qdfl	47	2	-3.702				
	Qm	7	0	-3.702				
	Qp	0	0	-3.702				
	Qth	1	0	-3.702				
	Qtp	2	0	-3.702				
Declividade	0 a 3°	68	2	-3.38	93	0.0021	0.52	0.24
	3 a 7°	9	5	-0.65				
	7° a 11°	6	0	-3.702				
	11° a 17°	6	9	0.38				
	17° a 27°	6	16	0.95				
	27° a 45°	4	47	2.36				
	> 45°	0	21	5.83				
Curvatura	Côncavo/convergente	12	40	1.22	79	0.012	0.07	0.08
	Retilíneo/Planar	76	21	-1.29				
	Convexo/divergente	13	40	1.14				
Solo	AM	2	0	-3.702	90.9	0.0014	0.16	0.13
	AQ1	8	5	-0.524				
	G1	2	0	-3.702				
	G2	17	0	-3.702				
	G5	7	0	-3.702				
	HP1	10	0	-3.702				
	LA9	7	47	1.847				
	PA_4	11	5	-0.861				
	PV2	16	42	0.973				
	PV3	1	2	0.466				
Uso e cobertura da terra	SM	18	0	-3.702				
	Assentamentos informais	1	19	3.388	53.4	0.0019	1.0	0.51
	Cana-de-açúcar	61	47	-0.265				
	Áreas urbanizadas	3	12	1.281				
	Cultivos diversificados	4	14	1.205				
	Floresta	2	5	1.091				
	Solo exposto por erosão	0	2	2.976				
	Vegetação arbustiva	1	2	0.652				
	Área comercial	0	0	-3.702				
	Áreas alagadas	1	0	-3.702				
	Complexo industrial	2	0	-3.702				
	Coqueiral	1	0	-3.702				
	Corpos d'água	2	0	-3.702				
	Horticultura	0	0	-3.702				
	Estabelecimentos de pesquisa e educação	0	0	-3.702				
	Estradas	0	0	-3.702				
	Extração de argila	0	0	-3.702				
	Casas individuais	0	0	-3.702				
	Mangue	11	0	-3.702				
	Mata ciliar	1	0	-3.702				
	Solo exposto para construção	1	0	-3.702				
	Usinas de cana-de-açúcar	0	0	-3.702				
	Vegetação herbácea	7	0	-3.702				

Table 3. Matriz de comparação pareada*

Parâmetros	Litologia	Curvatura	Solo	Declividade	Uso	Wi
Litologia	1	0,33	0,25	0,17	0,13	0,039
Curvatura	3	1,00	0,33	0,25	0,17	0,076
Solo	4	3	1	0,33	0,20	0,134
Declividade	6	4	3	1	0,25	0,236
Uso	8	6	5	4	1	0,515

* CR= 0,07

A razão de consistência (Consistency Ratio – CR) foi de 0,070, abaixo de 0,10, indicando que os resultados obtidos foram adequados ao desenvolvimento do modelo. Assim, os pesos dos fatores condicionantes (W_i) encontrados, respectivamente, para litologia, curvatura, solos, declividade e uso foram: 0,039, 0,076, 0,134, 0,236, 0,515 (Tabela 3).

Definição das classes de suscetibilidade a deslizamento e descrição das características principais

A definição das classes de suscetibilidade se deu com base no gráfico de densidade de deslizamentos utilizando o inventário destinado ao treinamento, compreendendo 80% dos deslizamentos na classe alta, 15% na classe média e 5% na classe baixa. Assim, ao final, no mapa gerado pela integração do Índice Estatístico e a AHP (Figura 9), as áreas representadas por baixas suscetibilidade correspondem a 85%, as médias 9% e as altas 5%.

As áreas definidas como de alta suscetibilidade são caracterizadas por rochas do complexo gnáissico migmatítico e biotita granito, bastante intemperizadas, originando solos predominantemente argilosos de cor avermelhada, podendo ser, em alguns pontos mais críticos, lateríticos, com declividades superiores a 27° e encostas côncavas-convergentes. Como agravante, a ocupação dessas áreas se dá de forma espontânea e sem planejamento, sendo representadas pelos assentamentos informais.

Validação

A fim de analisar a qualidade do modelo de suscetibilidade, calculou-se a área abaixo da curva das curvas ROC, considerando primeiramente o inventário de deslizamento destinado ao treinamento (modelo), representando a taxa de sucesso. Neste caso, o modelo apresentou um excelente desempenho com uma AAC=0,931 (93%), conforme a figura 10A. Por sua vez,

utilizando-se o inventário destinado a validação (taxa de predição), o modelo apresentou uma excelente performance, com uma AAC=0,906 (90%).

Analisando-se os resultados anteriores, verificou-se que a integração entre o Índice Estatístico e a AHP foi considerado excelente, por estar acima de 90% (Rasyid et al., 2016). Portanto, pode-se considerar que o modelo aqui proposto na elaboração dos mapas de suscetibilidade a deslizamentos, pode ser utilizado como etapa inicial dos mapeamentos de risco pelo método quantitativo, tornando o procedimento rápido e de fácil atualização.

Para finalizar, no presente artigo, buscou-se atender aos critérios e níveis de qualidade dos modelos quantitativos e estatísticos para avaliação e mapeamento da suscetibilidade a deslizamentos propostos por Guzzetti et al., (2006), Reichenbach et al., (2018) e Dias et al., (2021a,b), levando-se em consideração o potencial e as limitações do modelo analisado.

Conclusão

No presente estudo aplicou-se o modelo estatístico de análise bivariada denominado de Índice Estatístico (IE) para a definição dos pesos das classes dos fatores condicionantes e a análise multicritério *Analytic Hierarchy Process* (AHP), para associar um peso que cada fator exerce no desenvolvimento dos deslizamentos, a fim de analisar a relação entre os deslizamentos e os fatores condicionantes e mapear a suscetibilidade a deslizamentos na área de expansão urbana do município de Ipojuca, bem como analisar o desempenho do modelo.

Os fatores condicionantes utilizados no modelo (litologia, declividade, curvatura, solos e uso e cobertura da terra) e o inventário, com representação pontual localizado no topo da linha de ruptura dos deslizamentos, foram transformados em raster com resolução espacial de 2,5 metros. A precisão do cadastro das cicatrizes para o inventário de processos e a qualidade dos dados

temáticos foram fundamentais para aumentar a assertividade do modelo, principalmente quando a

unidade de mapeamento trabalhada é a célula de grade.

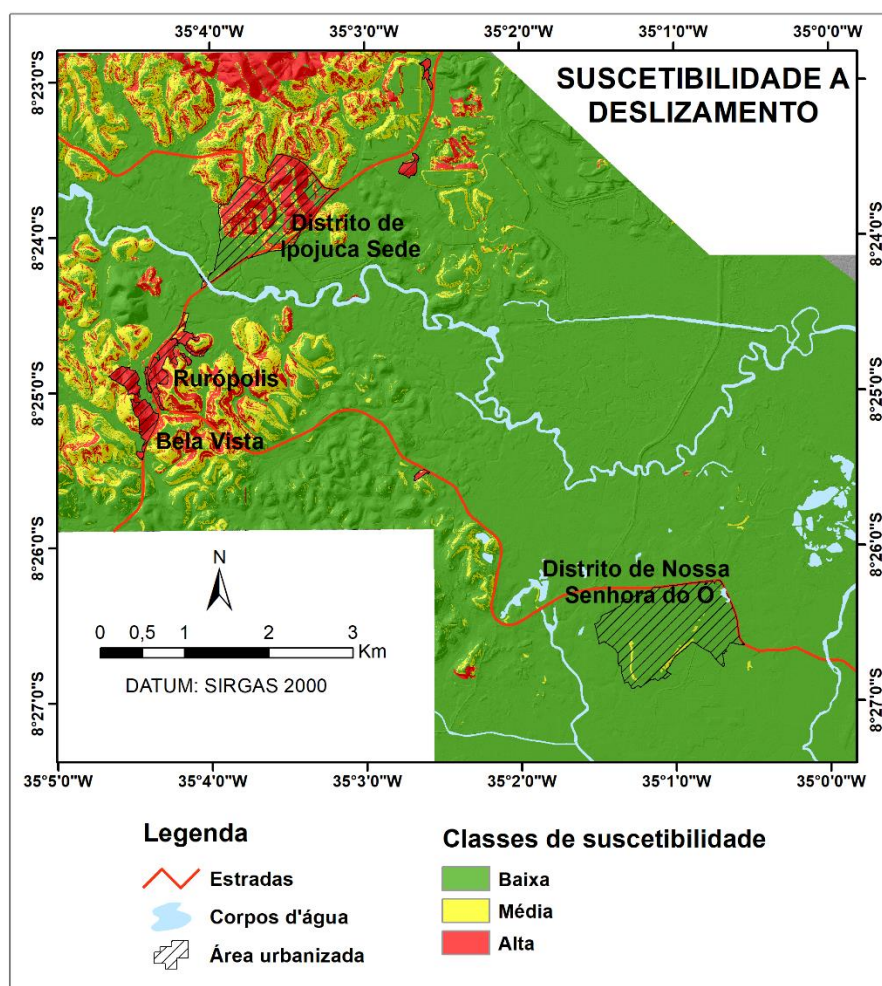


Figura 9. Zoneamento da suscetibilidade a deslizamentos com a integração entre o índice estatístico e AHP para a área de expansão urbana do município do Ipojuca-PE.

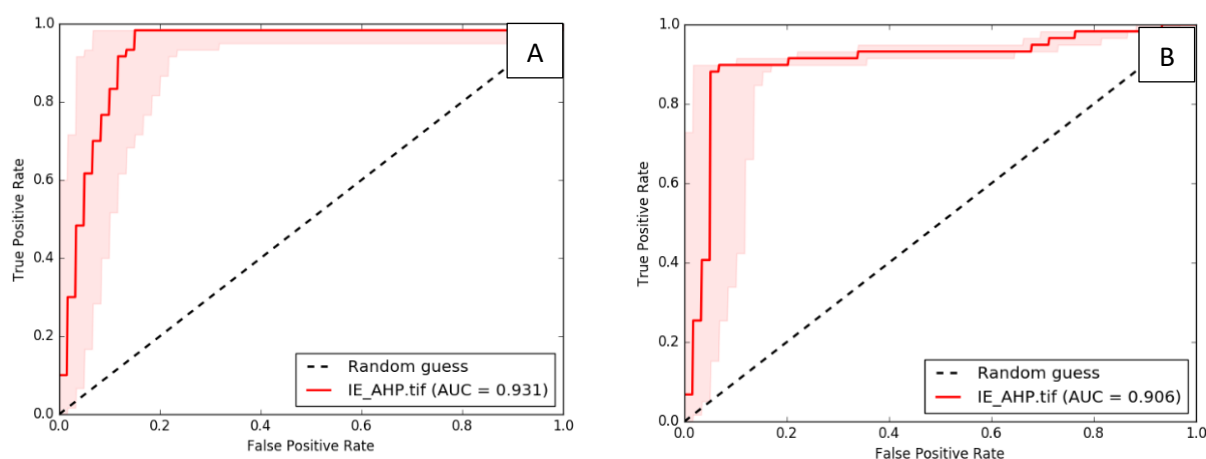


Figura 10. Curvas ROC com os respectivos valores de área abaixo da curva (AAC ou AUC – Area under the curve) considerando o inventário destinado ao modelo (A) e o inventário destinado à validação (B).

As áreas ocupadas por rochas cristalinas (Px e Ny3) e o pequeno trecho ocupado pela

Formação Algodoads, foram as classes de Unidades Litoestatigráficas mais suscetíveis.

Os deslizamentos foram mais frequentes nas declividades entre 27° e 45°, entretanto, com a aplicação do índice estatístico, a classe mais suscetível foram as declividades acima de 45°, em função da pequena extensão de área ocupada por estas declividades.

Com relação as formas de encostas (curvatura), as classes côncava/convergente e convexa/divergente, apresentaram a mesma densidade de deslizamentos (40%), no entanto, como a primeira abrange uma menor área, apresentou uma maior suscetibilidade que a anterior.

Os solos mais suscetíveis foram os Latossolos Amarelos, seguido dos Argissolos Vermelhos e Argissolos Amarelos. A suscetibilidade destes solos foi agravada pelo uso e cobertura da terra, visto que a classe assentamentos informais foram as mais suscetíveis, seguida das classes solo exposto por erosão e áreas urbanizadas.

Assim, as classes de dos fatores condicionantes mais determinantes nos deslizamentos foram as declividades acima de 45° ($S_i=5,83$) assentamentos informais ($S_i=3,38$) e solo exposto por erosão ($S_i=2,97$).

Os resultados do índice responsabilidade (Acc) e confiabilidade (Re) e do W_f foram bastante diferentes. O índice de confiabilidade foi o que representou os resultados concordantes com o Índice Estatístico, o que indica que as classes dos fatores mais determinantes apresentam uma quantidade significativa de deslizamentos em uma pequena extensão de área, se comparado a área total de estudo. Porém, os valores finais do peso (W_f) de cada fator condicionante, favoreceram o preenchimento da matriz de comparação pareada da AHP, obtendo-se, ao final, uma razão de consistência (RC) de 0,07, estando adequado a continuação do modelo. Esses resultados demonstraram estar de acordo com a realidade do município, uma vez que as ações antrópicas atuam como agentes predisponentes dos deslizamentos devido a precariedade das ocupações nos assentamentos informais localizados nas vertentes íngremes do município.

Após a validação do modelo os resultados tanto da taxa de sucesso quanto de predição foram considerados excelentes com área abaixo da curva das curvas ROC superior a 0,90. Desta forma, o modelo apresentou um excelente desempenho na predição da suscetibilidade a deslizamentos na área de expansão urbana entre Ipojuca Sede e Nossa senhora do Ó, localizados no município do Ipojuca.

Ademais, a junção de uma equipe especializada do GEGEP/UFPE na produção e/ou atualização dos mapas temáticos, o avanço nas

tecnologias de obtenção de processamento de dados LIDAR de alta resolução como softwares para Sistema de Informações Geográficas e Sensoriamento Remoto, hardwares mais potentes obtidos em parceria com os governos federal e estadual foram essenciais para a análise e zoneamento da suscetibilidade a deslizamentos no município do Ipojuca.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq pela bolsa de doutorado da autora. Ao Grupo de Pesquisas Grupo de Engenharia Geotécnica de Encostas Planícies e Desastres GEGEP/UFPE pelo apoio da equipe nos trabalhos de campo e laboratório, na disponibilidade do uso do software ArcGIS 10.3® nesta pesquisa, além de toda experiência compartilhada pelo Orientador no âmbito da Engenharia Geotécnica. A Secretaria de Desenvolvimento Econômico do Governo do Estado de Pernambuco pelo fornecimento dos das imagens de satélite, ortofotocartas, ortofotos e MDT, esse último gerado por perfilamento a Laser para o Projeto “Pernambuco Tridimensional” (<http://www.pe3d.pe.gov.br/>). E ao Ministério de Desenvolvimento Econômico e Regional (antigo Ministério das Cidades) do Governo Federal pelo financiamento do projeto “Elaboração de Cartas Geotécnicas de Aptidão a Urbanização frente a desastres do município do Ipojuca, Pernambuco, Brasil”, através de um acordo de cooperação técnica com o GEGEP/UFPE.

Referências

- Aleotti, P., R. & Chowdhury. (1999). Landslide Hazard Assessment: Summary Review and New Perspectives. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 58(1), 21–44. <https://doi.org/10.1007/s100640050066>.
- Aragão, M. L. & Duarte, C. C. (2023). Dinâmica climática, eventos extremos e impactos associados no município do Jaboatão dos Guararapes, Pernambuco, Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 16(2), 818–836. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v16.2.p818-836>.
- Bandeira, A. P. N., & R. Q. Coutinho. (2015). Critical Rainfall Parameters: Proposed Landslide Warning System for the Metropolitan Region of Recife, PE, Brazil. *Soils and Rocks*. 38(1), 27–48. DOI: 10.28927/SR.381027
- Barella, C. F., Sobreira, F. G. & Zêzere, J. L. (2019). A comparative analysis of statistical

- landslide susceptibility mapping in the southeast region of Minas Gerais state, Brazil. *Bulletin of Engineering Geology and Environment*, 78, 3205–3221. <https://doi.org/10.1007/s10064-018-1341-3>.
- Berhane, G. E. & Tadesse, K. (2021). Landslide susceptibility zonation mapping using statistical index and landslide susceptibility analysis methods: A case study from Gindeberet district, Oromia Regional State, Central Ethiopia. *Journal of African Earth Sciences*. 180. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2021.104240>.
- Blahut, J. Van Westen, C.J., & Sterlacchini, S. (2010). Analysis of landslide inventories for accurate prediction of debris-flow source areas. *Geomorphology*. 119(1–2), 36–51. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.02.017>.
- Bonini, J. E., Bateira, C. V. D. 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*, 46, 2020. <https://doi.org/10.4000/confins.30323>
- Burrough, P. A. (1991). *Principles of geographical information systems for land resources assessment*. Oxford: Clarendon Press, 333 p. https://webapps.itc.utwente.nl/librarywww/papers_2009/general/principlesgis.pdf
- Carvalho, C. S.; & Galvão, t. (Org.). (2006). *Prevenção de risco de deslizamentos em encostas: guia para elaboração de políticas municipais*. Brasília: Ministério das Cidades; Cities Alliance, 111 p.
- Castellanos Abella, E.A. (2008). *Provincial landslide risk assessment*. In: Castellanos Abella, E.A., *Multi-scale landslide risk assessment in Cuba*, Utrecht, Utrecht University. ITC Dissertation 154, 101–152 p. https://www.researchgate.net/publication/43945886_Provincial_landslide_risk_assessment_THESIS_VERSION
- Chung, C., & Fabbri, A.G. (2003). Validation of Spatial Prediction Models for Landslide Hazard Mapping. *Natural Hazards*, 30, 451–472. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1023/B:NHAZ.0000007172.62651.2b.pdf>.
- Corominas, J., van Westen, C., Frattini, P. et al. (2014). Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. *Bull Eng Geol Environ*, 73, 209–263 <https://doi.org/10.1007/s10064-013-0538-8>
- Coutinho, R. Q. (Coord.). (2014). *Carta geotécnica de aptidão à urbanização frente a desastres naturais do município do Ipojuca, Pernambuco: relatório técnico*. Termo de Cooperação Ministério das Cidades e Universidade Federal de Pernambuco. Recife: GEGEP; UFPE.
- Coutinho, R. Q., Henrique, H. M., Duarte, C. C., Nascimento, D. M. (2016). Risk mapping for landslides and erosion in the municipality of Ipojuca-PE—Rurópolis Community. In Aversa, S. et al. *Landslides and Engineered Slopes. Experience, Theory and Practice*. CRC Press, London. <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9781315375007-70/risk-mapping-landslides-erosion-municipality-ipojuca-pe%E2%80%94rur%C3%B3polis-community-coutinho-henrique-duarte-nascimento>.
- Cruden, D.M. & Varnes, D. (1996). Landslide Types and Processes. In Turner, A.K Schuster, R.L. (Eds). *Landslides Investigation and Mitigation*. National Academy Press, Special Report 247. Washington, p. 337–370. <https://trid.trb.org/view/462501>.
- Dias, H.C., Hölbling, D., & Grohmann, C.H. (2021a). Landslide Susceptibility Mapping in Brazil: A Review. *Geosciences*, 11, 425. <https://doi.org/10.3390/geosciences11100425>.
- Dias, H. C., Gramani, M .F., Grohmann, C. H., Vieira, B. C. (2021b). Statistical-based shallow landslide susceptibility assessment for a tropical environment: a case study in the southeastern Brazilian coast. *Nat Hazards*. 08, 205–223. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04676-y>.
- Duarte, C. C., Nóbrega, R. S., Coutinho, R. Q., (2015). Análise climatológica e dos eventos extremos de chuva no município do Ipojuca, Pernambuco. *Revista de Geografia (UFPE)*, [online] 32(2). <https://periodicos.ufpe.br/revistas/revistageografia/article/viewFile/229222/23602>.
- Esteves, L. V., Esteves, A. M. S. L., da Paz, D. H. F., & Coutinho, A. P. (2023). Caracterização Morfométrica e Uso do Solo da Bacia Hidrográfica do Rio Sirinhaém (BHRS), Pernambuco, Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 16(5), 2609–2623. <https://doi.org/10.26848/rbgef.v16.5.p2609-2623>.
- Fell, R., Corominas, J., Bonnard, C., Cascini, L., Leroi, E., & Savage, W. Z. (2008). Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk

- zoning for land use planning. *Engineering Geology*, 102 (3–4), 85–98. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.02>.
- Froude, M. J. & Petley, D. N. (2018). Global fatal landslide occurrence from 2004 to 2016. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 18, 2161–2181. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-2161-2018>.
- Gama, W. M. & Falcão, N. A. M. (2023). Suscetibilidade a deslizamentos pelo método estatístico bivariado na bacia hidrográfica do Riacho do Silva, Maceió, Alagoas, Brasil. *Revista Contexto Geográfico*, 8(16), 46–61. <https://doi.org/10.28998/contegeo.8i16.1548>.
- Garcia, R. A. C. (2012). Metodologias de avaliação da perigosidade e risco associado a movimentos de vertente: aplicação na bacia do rio Alenquer. 469 f. Tese (Doutorado em Geografia Física) – Universidade de Lisboa, Lisboa. <https://repositorio.ul.pt/handle/10451/7377>
- Greenbaum, D., Bowker, M. R., Dau, I., Dropsy, H., Grealley, K. B., McDonald, A., & Tragheim, D. G. (1995a). Rapid methods of landslide hazard mapping: Fiji case study. Technical Report WC/95/28, British Geological Survey (BGS), Natural Environmental Research Council, Keyworth, Nottingham. <https://core.ac.uk/download/pdf/58059.pdf>.
- Greenbaum, D. et al. 1995b. Rapid methods for landslide hazard mapping: Papua New Guinea case study. Technical Report WC/95/27. British Geological Survey (BGS), Natural Environmental Research Council, Keyworth, Nottingham. <https://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/9967/1/WC95027.pdf>
- Guillard, G. & Zêzere, J. (2012). Landslide Susceptibility Assessment and Validation in the Framework of Municipal Planning in Portugal: The Case of Loures Municipality. *Environmental management*. 50, 721–35. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00267-012-9921-7>.
- Guzzetti, F. (2005). Landslide Hazard and Risk Assessment. Thesis Doctoral: 373. <http://geomorphology.irpi.cnr.it/Members/fagusto/PhD-dissertation>.
- Guzzetti, F., Reichenbach, P., Ardizzone, F., Cardinali, M., & Galli, M. (2006). Estimating the quality of landslide susceptibility models. *Geomorphology*, 81(1–2), 166–184. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.04.007>.
- Hungr, O., Leroueil, S. & Picarelli, L. (2014). The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, 11, 167–194. <https://doi.org/10.1007/s10346-013-0436-y>.
- IBGE. Censo demográfico 2010: características da população e dos domicílios: resultados do universo. Rio de Janeiro, 2011. Não paginado.
- IBGE. (2013) Manual técnico de uso da terra. 3. ed. 171 p. <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?id=281615&view=detalhes>
- IBGE (2018). População em áreas de risco no Brasil. <https://www.ibge.gov.br/geociencias-novoportal/organizacao-do-territorio/tipologias-doterritorio/21538-populacao-em-areas-de-risco-no-brasil.html?=&t=acesso-ao-produto>
- Kavzoglu, T., Kutlug Sahin, E. & Colkesen, I. 2015. An assessment of multivariate and bivariate approaches in landslide susceptibility mapping: a case study of Duzkoy district. *Nat Hazards*, 76, 471–496 <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1506-8>.
- Listo, F. L. & Santos, E. M. (2023). Scenarios of susceptibility to shallow landslides using the shalstab model and validation by roc curve, Metropolitan Region of Recife, Northeastern Brazil. *Revista de Geografia (Recife)*. 40(1). <https://doi.org/10.51359/22386211.2023.256630>.
- Macedo, E. S. & Sandre, L. H. (2022). Mortes por deslizamentos no Brasil: 1988 a 2022. *Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental*, 12(1), 110–117. <https://www.abge.org.br/downloads/10.pdf>.
- Marengo, J. A., Alcantara, E., Cunha, A. P., M. Seluchi, Nobre, C. A., G. Dolif, Gonçalves, D., Assis Dias, M., Cuartas, L. A., Bender, F., Ramos, A. M., Mantovani, J. R., Alvala, R. C., Moraes, O. L. (2023). Flash floods and landslides in the city of Recife, Northeast Brazil after heavy rain on May 25–28, 2022: Causes, impacts, and disaster preparedness. *Water and Climate Extremes* [Online], 39. <https://www.sciencedirect.com/journal/weather-and-climate-extremes>.
- Melo, R., & Zêzere, J. L. (2017). 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*, 18(1). <https://doi.org/10.20502/rbg.v18i1.985>.
- Mendes, R. M., Andrade, M. R. M., Tomasella, J., Moraes, M. A. E., & Scofield, G. B. (2018). Understanding shallow landslides in Campos do Jordão municipality – Brazil: disentangling the anthropic effects from

- natural causes in the disaster of 2000, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 18, 15–30, <https://doi.org/10.5194/nhess-18-15-2018>.
- Moore, I. D.; & Grayson, R. B. (1991). Terrain-based catchment partitioning and runoff prediction using vector elevation data. *Water Resources Research*, 27(6), 1.171-1.191. <https://doi.org/10.1029/91WR00090>.
- Myronidis, D., Papageorgiou, C., & Theophanous, S. (2016). Landslide susceptibility mapping based on landslide history and analytic hierarchy process (AHP). *Nat Hazards*, 81, 245–263. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-2075-1>.
- Nicu, I. C., & Asăndulesei, A. (2018). GIS-based evaluation of diagnostic areas in landslide susceptibility analysis of Bahluiet River Basin (Moldavian Plateau, NE Romania). *Are Neolithic sites in danger?*, *Geomorphology*, 314, 27-41. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.04.010>.
- Panchal, S., & Shrivastava, A. K. (2021). A Comparative Study of Frequency Ratio, Shannon's Entropy and Analytic Hierarchy Process (AHP) Models for Landslide Susceptibility Assessment. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* 10, 603. <https://www.mdpi.com/2220-9964/10/9/603>
- Pasang, S.; & Kubiček, P. (2020). Landslide Susceptibility Mapping Using Statistical Methods along the Asian Highway, Bhutan. *Geosciences*, 10, 430. <https://doi.org/10.3390/geosciences10110430>.
- Pardeshi, S. D., Autade, S. E., & Pardeshi, S. (2013). *Landslide Hazard Assessment: Recent Trends and Techniques*. SpringerPlus 2(1): 1–23. <https://doi.org/10.1186/2193-1801-2-523>.
- Pernambuco. (2016). *Pernambuco Tridimensional: manual para obtenção dos dados*. Consórcio Águas de Pernambuco, Governo do Estado de Pernambuco, Recife. <http://www.pe3d.pe.gov.br/documentos/manual.pdf>
- Pfaltzgraff, P. A. S. (1998). *Carta geotécnica e de suscetibilidade a processos geológicos do município de Ipojuca, Pernambuco*. Recife: CPRM/Fidem, 18 p. https://rigeo.sgb.gov.br/bitstream/doc/17367/1/rel_carta_geotecnica_ipojucav2.pdf
- Pfaltzgraff, P. A. S. (2007). *Mapa de suscetibilidade a deslizamentos na região metropolitana do Recife*. 153 p. Tese (Doutorado em Geociências). <https://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/273>
- Santos, R. D., Santos, H. G., Ker, J. C., Anjos, L. H. C., & Shimizu, S. H. *Manual de descrição e coleta de solos no campo*. 7 ed. Sociedade Brasileira de Ciências do Solo. <https://www.ofitexto.com.br/manual-de-descricao-e-coleta-de-solo-no-campo/p>
- Rai, D.K., Xiong, D., & Zhao, W. (2022). An Investigation of Landslide Susceptibility Using Logistic Regression and Statistical Index Methods in Dailekh District, Nepal. *Chin. Geogr. Sci.* 32, 834–851. <https://doi.org/10.1007/s11769-022-1304-2>.
- Rasyid, A.R., Bhandary, N.P. & Yatabe, R. (2016). Performance of frequency ratio and logistic regression model in creating GIS based landslides susceptibility map at Lompobattang Mountain, Indonesia. *Geoenviron Disasters*, 3, 19. <https://geoenvironmental-disasters.springeropen.com/articles/10.1186/s40677-016-0053-x>.
- Reichenbach, P., Rossi, M., Malamud, B. D., Mihir M., & Guzzetti, F. (2018). A Review of Statistically-Based Landslide Susceptibility Models. *Earth-Science Reviews*, 180, 60–91. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.03.001>.
- Rosa, M. L., Sobreira, F. G., & Barella, C. F. (2021). Landslide susceptibility mapping using the statistical method of Information Value: A study case in Ribeirão dos Macacos basin, Minas Gerais, Brazil. *An Acad Bras Cienc* 93(1). <https://doi.org/10.1590/0001-3765202120180897>.
- Rossi, M. & Reichenbach, P. (2016). Land-se: a software for statistically based landslide susceptibility zonation, version 1.0, *Geosci. Model.* 9, 3533–3543. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3533-2016>.
- Rossi, M., Bornaetxea, T., & Reichenbach, P. (2022). LAND-SUITE V1.0: a suite of tools for statistically based landslide susceptibility zonation. *Geosci. Model Dev.*, 15, 5651–5666, <https://doi.org/10.5194/gmd-15-5651-2022>.
- Saaty, R. W. (1987). The analytic hierarchy process—what it is and how it is used. *Mathematical Modelling*, 9,(3–5), 161-176. [https://doi.org/10.1016/027-255\(87\)90473-8](https://doi.org/10.1016/027-255(87)90473-8).
- Sabatakakis, N., Koukis, G., & Vassiliades, E. (2013). Landslide susceptibility zonation in Greece. *Nat Hazards*. 65, 523–543. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0381-4>.
- SGB/CPRM - Serviço Geológico do Brasil. (1996).

- Mapa geológico das folhas Ipojuca/ Ponta da Gambôa e Sirinhaém- escala 1:25000. Recife: LAGESE, 53p. il. Lima Filho, M. (Org.)
- Tating, F., & Hack, R. H. R. G. K. (2015). Landslide susceptibility assessment using information value statistical method: a case study on northern Kota Kinabalu, Sabah. *Malaysian Journal of Remote Sensing & GIS*, 4 (2), 94-111. https://www.researchgate.net/profile/Rabieah-tul-Abu-Bakar/publication/330439928_MJRSGIS_vol_4_num_2/links/5c3ff79b299b12be3cda65f/MJRSGIS-vol-4-num-2.pdf#page=49.
- Torres, F. S. M., Coutinho, R. Q., Duarte, C. C., Menezes, J. B., Fonsêca, D. N., & Pfaltzgraf, P. A. S. (2015). Carta de suscetibilidade a movimentos de massa e erosão do município do Ipojuca-PE. *Geotecnia*, 135, 67-88. <https://doi.org/10.24849/j.geot.2015.135>.
- Vakhshoori, V.; & Zare, M. (2018). Is the ROC curve a reliable tool to compare the validity of landslidesusceptibility maps? *Geomatics, natural hazard and risk*, 9(1), 249-266. <https://doi.org/10.1080/19475705.2018.1424043>.
- Van Westen, C.J. (1993). Application of Geographical Information System to Landslide Hazard Zonation. ITC Publication, 15, 245. https://www.researchgate.net/publication/233865351_Application_of_Geographic_Information_Systems_to_Landslide_Hazard_Zonation.
- Van, Westen, C.J. (1997). Statistical Landslide Hazard Analysis. *Ilwis*: 1–10. <https://www.itc.nl/ilwis/applications-guide/application-5/>.
- Wanderley, L. S. A.; Nóbrega, R. S.; Duarte, C. C.; Moreira, A. B.; & Anjos, R. S. (2021). Weather Types Associated with Daily Intense Rainfall Events in The City of Recife - PE, Brazil. *Sociedade & Natureza*, 33(1). <https://doi.org/10.14393/SN-v33-2021-60520>.
- Xavier, J. P. de S., Listo, F. de L. R., & Nery, T. D. (2022). Escorregamentos no estado de Pernambuco. *Mercator*, 21, <https://doi.org/10.4215/rm2022.e21003>.
- Yalcin, A., S., Reis, A. C. Aydinoglu, & T. Yomralioglu. (2011). A GIS-Based Comparative Study of Frequency Ratio, Analytical Hierarchy Process, Bivariate Statistics and Logistics Regression Methods for Landslide Susceptibility Mapping in Trabzon, NE Turkey. *catena*, 85(3), 274–87. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2011.01.014>.
- Yalcin, A. (2008). GIS-based landslide susceptibility mapping using analytical hierarchy process and bivariate statistics in Ardesen (Turkey): Comparisons of results and confirmations. *Catena*, 72, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2007.01.003>.
- Yan, F., Zhang, Q., Ye, S., & Ren, B. (2019). A Novel Hybrid Approach for Landslide Susceptibility Mapping Integrating Analytical Hierarchy Process and Normalized Frequency Ratio Methods with the Cloud Model. *Geomorphology*, 327, 170–87. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.10.024>.
- Zevenbergen, L. W., & Thorne, C. R. (1987). Quantitative analysis of land surface topography. *Earth surface processes and landforms*, 12(1), 47-56. <https://doi.org/10.1002/esp.3290120107>.
- Zêzere, J. L. (2002). Landslide susceptibility assessment considering landslide typology. A case study in the area north of Lisbon (Portugal), *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 2, 73–82. <https://doi.org/10.5194/nhess-2-73-2002>.
- Zêzere, J.L., Pereira, S., Melo, R., Oliveira, S.C., & Garcia., R.A.C. (2017). Mapping landslide susceptibility using data-driven methods. *Science of The Total Environment*, 589, 250-267. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.188>.
- Zhang, G., Cai, Y., Zheng, Z., Zhen, J., Liu, Y. & Huang, K. (2016). Integration of the Statistical Index Method and the Analytic Hierarchy Process technique for the assessment of landslide susceptibility in Huizhou, China. *Catena*, 142, 233-244. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.03.028>.
- Zhu, A. X., Wang, R., Qiao, J., Qin, Cheng-Z., Chen, Y., Liu, J., Du, F., Lin, Y., & Zhu, T. (2014). An expert knowledge-based approach to landslide susceptibility mapping using GIS and fuzzy logic. *Geomorphology*, 214, 128-138. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.02.003>.