



ISSN: 2447-3359

REVISTA DE GEOCIÊNCIAS DO NORDESTE

Northeast Geosciences Journal

v. 10, nº 2 (2024)

<https://doi.org/10.21680/2447-3359.2024v10n2ID333482>



Mapeamento de suscetibilidade a movimentos de massas na área urbana de Areia-PB

Mapping susceptibility to mass movements in the urban area of Areia-PB.

Bruna Hélen Brito de Araújo¹; Danylo de Andrade Lima²; Bruna Silveira Lira³; Olavo Francisco dos Santos Júnior⁴

¹ Universidade Federal de Campina Grande, CTRN, Campina Grande/PB, Brasil. Email: bruna.helen@estudante.ufcg.edu.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3710-2484>

² Universidade Federal de Campina Grande, CTRN, Campina Grande/PB, Brasil. Email: danylo.andrade123@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-4212-9596>

³ Universidade Federal do Piauí, DRHGSA, Teresina/PI, Brasil. Email: bruna.lira@ufpi.edu.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7690-3941>

⁴ Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Natal/RN, Brasil. Email: olavo.santos@ufrn.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7552-6646>

Resumo: Desastres em encostas urbanas brasileiras são consequências de um conjunto de fragilidades geomorfométricas, potencializados pela ação humana. A identificação de áreas cuja dinâmica natural favorece a instabilização do maciço é um subsídio para o planejamento e ocupação do espaço urbano. Para tanto, as unidades gestoras precisam de dados confiáveis e otimizados para a tomada de decisão. Diante das condições do município de Areia/PB, município situado em uma região serrana do estado, esse estudo objetivou mapear as áreas mais susceptíveis a ocorrência de movimentos de massas em encostas através de um modelo baseado em SIG e AHP (Analytic Hierarchy Process). Foram considerados 8 critérios mapeáveis para o estudo. Após aplicação do método SIG-AHP, observou-se que os resultados foram compatíveis com o levantamento de dados e estudos prévios elaborados para cidade. Os critérios de Estradas, Geologia, Uso e Cobertura do Solo, Altitude e Declividade foram os mais críticos nesta análise. No total, 51,9 % da área estudada está nas classes mais altas de suscetibilidade. Observou-se ainda que 91,7 % pontos de movimentos de massa mapeados durante os trabalhos de campo encontram-se nas áreas de maior suscetibilidade.

Palavras-chave: Desastres ambientais; Multicritério; Geoprocessamento.

Abstract: Disasters on Brazilian urban slopes are consequences of a set of geomorphometric weaknesses, intensified by human action. The identification of areas whose natural dynamics favor the instability of the massif is a subsidy for the planning and occupation of urban space. Therefore, the management units need reliable and optimized data for decision making. Faced with the conditions of the municipality of Areia/PB, a municipality located in a mountainous region of the state, this study aimed to map the areas most susceptible to the occurrence of mass movements on slopes through a model based on GIS and AHP (Analytic Hierarchy Process). Eight mappable criteria were considered for the study. After applying the GIS-AHP method, it was observed that the results were compatible with the data collection and previous studies prepared for the city. The criteria of Roads, Geology, Land Use and Coverage, Altitude and Slope were the most critical in this analysis. In total, 51.9% of the studied area is in the highest susceptibility classes. It was also observed that 91.7% of the mass movement points mapped during the field work were found in the areas of greatest susceptibility.

Keywords: Environmental Disasters; Multicriteria; Geoprocessing.

Recebido: 02/08/2023; Aceito: 12/09/2023; Publicado: 27/11/2024.

1. Introdução

Desastres em encostas urbanas são resultado de um conjunto de fragilidades geomorfométricas, potencializados por ações antrópicas. O aumento da urbanização das cidades torna necessário a identificação de regiões, cuja dinâmica natural favorece a instabilização dos maciços de solo nas encostas. A identificação de áreas potencialmente instáveis representa uma alternativa ao planejamento e gestão do espaço urbano, bem como sua ocupação. Conforme Kamp *et al.*, (2008) a primeira etapa de qualquer avaliação e gestão de danos por movimentos de massa é um mapa de inventário. Em seguida, são necessários a produção de um mapa de suscetibilidade, com a distribuição espacial dos parâmetros de controle do evento, um mapa de perigo, que inclui um quadro temporal, com a probabilidade de ocorrência de movimentos de massas dentro de um período de tempo especificado e, por fim, a criação de um mapa de risco, que descreve o custo esperado dos danos causados em toda a área afetada. Para Achour e Purgasemi (2020) a elaboração do mapa de suscetibilidade é vital para a prevenção dos processos de instabilidade de encostas.

Movimentos de massa são processos geodinâmicos causados por variáveis de diferentes categorias como fatores geológicos, geomorfológicos, geotécnicos, mudanças climáticas e atividades humanas. Do ponto de vista geológico, o perfil do solo e as propriedades geotécnicas dos materiais que compõem o maciço são cruciais na influência da instabilidade do talude (LIRA *et al.*, 2020). Gerscovich (2016) afirma que os taludes naturais estão sempre sujeitos a problemas de instabilidade, em função das ações das forças gravitacionais que induzem o movimento que, por sua vez, recebe contribuições tanto de parâmetros naturais quanto antrópicos. Vale ressaltar que cada fator pode influenciar mais diretamente do que outros.

Grande parte dos mapeamentos de encostas no Brasil são realizados por metodologias qualitativas, cujas análises são baseadas na opinião de especialistas, através de observações obtidas em campo e informações dos moradores da região. Embora possa subsidiar as ações de mitigação de risco ambiental, muitos pesquisadores da temática acreditam que a abordagem do método gera certa subjetividade sobre o resultado final obtido. Dessa forma, se faz necessário o aprimoramento das técnicas tradicionais buscando atenuar essa deficiência (BEZERRA *et al.*, 2020).

Atualmente, os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) desempenham um papel fundamental no mapeamento de suscetibilidade a movimentos de massas em encostas. Através dos SIG's, múltiplos dados geocientíficos espaciais ou não podem ser processados e analisados. Nesse sentido, o uso do ambiente SIG incorporando rotinas de apoio à decisão, são mecanismos que podem simplificar a valoração de dados, reduzir inconsistências e fornecer elementos que permitam uma indicação mais objetiva das áreas mapeadas (NASCIMENTO, MARQUES E SIMÕES, 2022; BAHRAMI, HASSANI E MAGHSOUDI; 2021).

Embora existam metodologias de mapeamento mais modernas, a *Analytic Hierarchy Process* (AHP) tem se mostrado adequado em avaliações de suscetibilidade para áreas com falta de inventário detalhado (CHANU, BAKIMCHANDRA; 2022). Este método tem sido empregado com sucesso na literatura como forma de explicitar e quantificar aspectos subjetivos envolvidos nas avaliações de movimentos de encostas, reduzindo a subjetividade da análise e tornando os estudos mais sistemáticos (FARIA, 2011; BEZERRA *et al.*, 2020).

Diante da atual situação do município de Areia (PB), com histórico de ocupação desordenado e frequentes relatos de movimentos de massa, o objetivo deste estudo foi mapear a área urbana do município, distinguindo classes de suscetibilidade, a partir de análises multicritérios espaciais em software SIG. Os resultados alcançados com esta pesquisa podem subsidiar a tomada de decisão da gestão municipal responsável pela administração urbanística, pois permitem uma atuação mais ampla e uma visão mais integrada dos aspectos de uso e ocupação do solo.

2. Metodologia

2.1 Caracterização da área de estudo

O estudo se desenvolveu na parcela urbana do município de Areia, estado da Paraíba, localizada à 122,5 km da capital João Pessoa. O município possui 269,13 km² de área territorial e, aproximadamente, 2,5 km² de área urbana. A população do último censo é de 22.633 habitantes e a densidade demográfica é de 84,1 hab/km² (IBGE, 2022). O município de Areia (PB) está inserido no Brejo Paraibano que consiste em uma região com topografia elevada, relevo fortemente ondulado, sob condições de clima úmido e elevadas precipitações, cuja ocupação urbana tem se estendido ao longo de encostas e fundos de vales. A Figura 1 mostra a localização do município no estado da Paraíba, bem como o recorte da área urbana, onde se desenvolveu esta pesquisa.

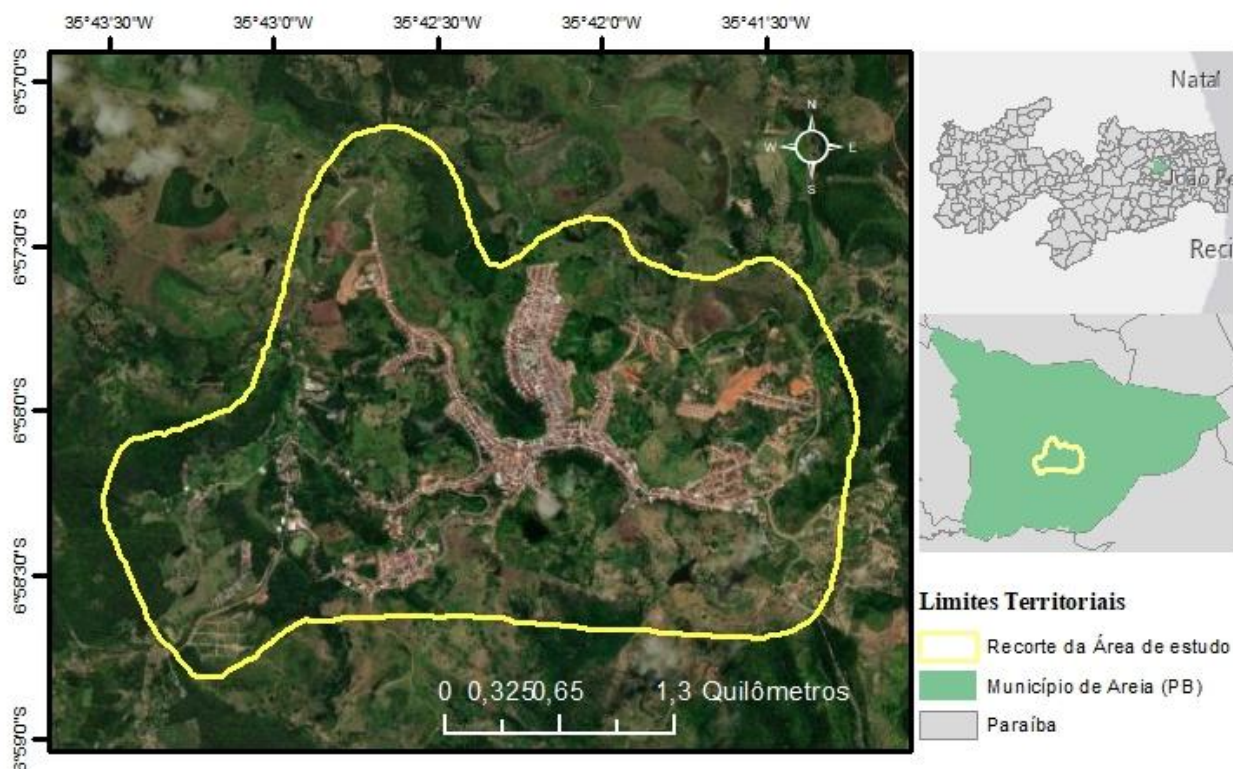


Figura 1 – Localização da área de estudo.
Fonte: Autores (2023).

Areia (PB) tem histórico de movimentos de massa, especialmente na estação chuvosa, embora não haja a documentação desses eventos. Além disso, o município carece de um plano diretor que mapeie e delimite as áreas inadequadas à ocupação. No ano de 2015, a Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) identificou quatro setores de alto risco de deslizamentos na área urbana do município, por meio de observações das condições de construções, topografia e declividade do terreno, condições de escoamento de águas e indícios de processos geológicos (CPRM, 2015).

Implantada sobre o relevo escarpado da serra da Borborema, o modelo de urbanização de Areia (PB) não foge da tendência nacional, onde na maioria das vezes as cidades crescem sem um planejamento e gerenciamento de uso do espaço urbano, contribuindo consideravelmente para a ocupação de áreas geologicamente frágeis (COSTA, 2012). Dessa forma, tem-se que as áreas mais vulneráveis são as da explosão demográfica (1901-2005), onde coexistem construções seguras e construções estruturalmente frágeis. Mesmo com a vulnerabilidade desencadeada pelas características ambientais e de uso e ocupação do solo, o Plano Diretor do município não traz soluções e mediações de curto e longo prazo para a paisagem geomorfológica-urbana de risco (MARQUES *et al.*, 2017).

Sousa (2020) e Lira (2022) coletaram e estudaram amostras deformadas e indeformadas dessas áreas, por meio da realização de ensaios laboratoriais e sondagem de simples reconhecimento. Os materiais estudados foram classificados como solos residuais, muito intemperizados, potencialmente colapsíveis e bastante compressíveis. Quando na presença de água, apresentaram redução da resistência ao cisalhamento principalmente pela perda total da parcela de coesão, quando comparados aos solos ensaiados na condição não inundada, o que caracteriza um indicativo de solos instáveis.

O município em estudo tem predominância de relevo fortemente ondulado, com presença de morros, serras baixas e escarpas serranas. A existência de superfícies planas gera descontinuidades no relevo do município, favorecendo a percolação de fluidos, desprendimento de blocos e placas em taludes de corte, o intemperismo e a erosão. Tem predominância de solos argilo-siltico-arenoso, com erosividade variando de moderada a alta (CPRM, 2016). Inserido na unidade geoambiental do Planalto da Borborema, o município apresenta clima Tropical Chuvoso, com verão seco. A estação chuvosa se inicia entre os meses de janeiro e fevereiro com término em setembro, podendo se estender até outubro

(CPRM, 2015). No último ano (2022), o período chuvoso ocorreu entre março e agosto, com precipitação máxima de 107,80 mm no mês de março (AESAs, 2023).

As pastagens predominam, cobrindo mais da metade da área estudada. Em seguida, as vegetações de porte florestal, que representa a presença de uma vegetação densa e úmida, envoltas pela vegetação da Caatinga. As áreas de construções correspondem a 15,4% de cobertura do solo, e representam áreas estruturadas por edificações e sistema viário. As culturas agrícolas, solo exposto e vegetação arbustivas são pouco representativas na área estudada, somando 5,4 % de cobertura (ANDRADE, MACHADO, 2018).

Compõem a geologia da área urbana do município a Formação Serra dos Martins, a Suíte Intrusiva Itaporanga e o Complexo São Caetano, com predominância deste último. O Complexo São Caetano apresenta uma sequência metassedimentar e metavulcanoclástica. De acordo com Santos (1995) as rochas metassedimentares são rochas metamórficas que têm como origem uma rocha sedimentar, enquanto rochas metavulcanoclásticas são rochas metamórficas que se originam de rocha vulcânica composta por fragmentos ou clastos de minerais e rochas pré-existentes. A Formação Serra dos Martins é interpretada como depositada sobre ambiente fluvial, onde no topo da formação ocorre uma crosta laterítica de cor vermelha a roxa, com seixos de quartzo angulosos, mal selecionados. A Suíte Intrusiva Itaporanga compreende monzogranitos a sienogranitos porfiríticos grossos, contendo Mg-hornblenda e, micas com composição Mg-biotita (GALINDO *et al.*, 2006).

Sobre a pedologia do município, há uma predominância da classe dos Argissolos Vermelhos Eutróficos, solos com alto teor de óxidos de ferro e de alta fertilidade (CPRM, 2015; EMBRAPA, 2021).

2.2 Aplicação da metodologia AHP - Estruturação

A aplicação da AHP baseada em SIG tem sido empregada com sucesso na literatura como forma de explicitar e quantificar aspectos subjetivos envolvidos nas avaliações de encostas, reduzindo a subjetividade e tornando os estudos mais sistemáticos. A flexibilidade do enfoque qualitativo e a consistência do enfoque quantitativo tem se configurado como uma alternativa eficaz para determinação de áreas propensas a eventos extremos (FARIA, 2011).

De forma geral, três etapas orientam a solução de problemas usando a AHP: decomposição do problema, julgamentos comparativos e síntese de prioridades. A etapa de decomposição consiste em estruturar o problema em níveis hierárquicos, “do mais geral ao mais particular e concreto” (SAATY, 1987). Dessa forma, 8 possíveis fatores condicionantes foram selecionados para análise, bem como suas respectivas classes foram determinadas. A Figura 2 ilustra a estruturação do problema.

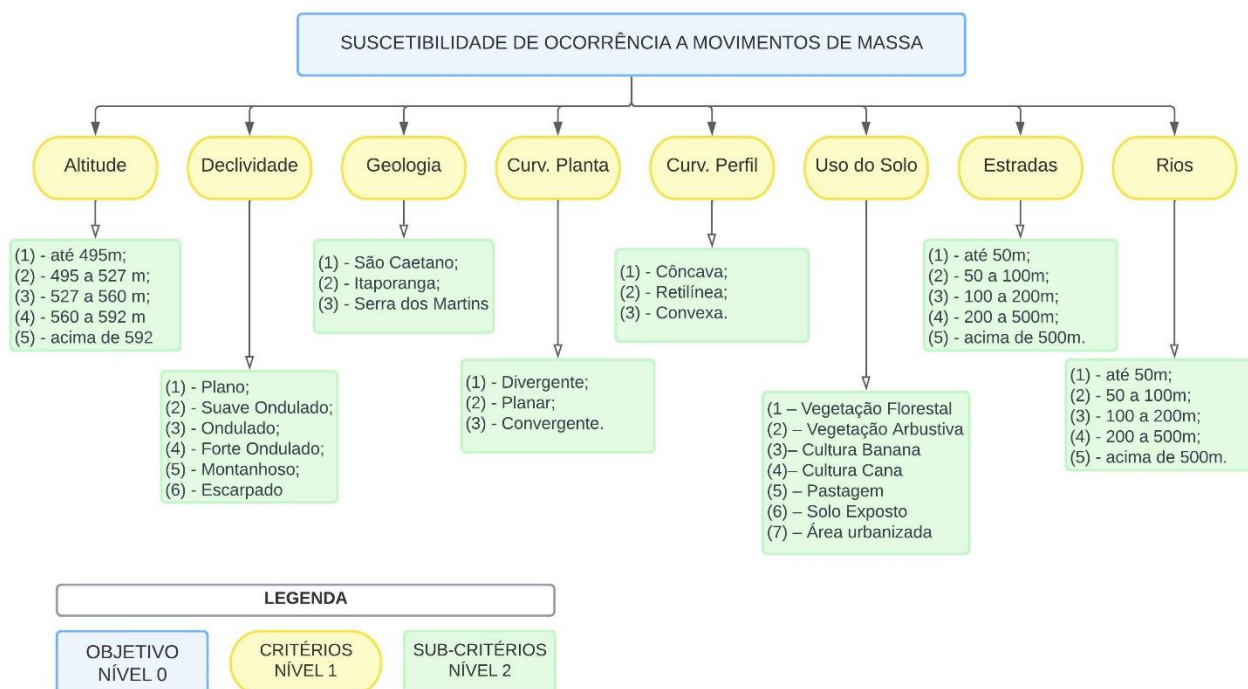


Figura 2 – Estrutura hierárquica para aplicação do método AHP no município de Areia (PB).

Fonte: Autores (2023).

Altitude: Influencia diversos parâmetros biofísicos e atividades antrópicas que, por sua vez, podem gerar falhas nos taludes e afetar sua estabilidade (PRADHAN, KIM, 2016). O mapa de altitude foi elaborado a partir do *Copernicus DEM* (*Digital Elevation Model*), Modelo Digital de Elevação (MDE) do Programa Europeu *Copernicus*. O critério foi agrupado em 5 classes de iguais intervalos.

Declividade: O movimento de massa é mais comum quando as encostas são mais íngremes do que o ângulo natural de repouso do substrato e quando não há coesão suficiente para inibir a ruptura do talude (KAMP *et al.*, 2008). O mapa de declividade foi derivado do *Copernicus DEM* (ESA, 2022). O critério foi reclassificado em 6 classes, conforme classificação da Embrapa (1979).

Morfologia: A forma do terreno caracteriza a superfície em formas côncavo-convexo-plano e suas variações. Atua como um parâmetro de concentração ou dispersão de fluxo superficial e tem uma forte influência na estabilidade do talude em terrenos íngremes (PRADHAN; KIM, 2016). As variáveis de curvatura do terreno foram divididas em morfologia em planta (curvatura horizontal) e em perfil (curvatura vertical), cuja elaboração derivou do *Copernicus DEM*. A curvatura horizontal foi reclassificada em convergente, planar e divergente, já a curvatura vertical, em côncava, retilínea e convexa.

Geologia: As variações das unidades litológicas condicionam as ocorrências de movimento de massa, pois têm diversos graus de suscetibilidades. Muitos pesquisadores da área utilizaram a litologia como um parâmetro de entrada para avaliar a suscetibilidade dos movimentos (MEZUGHI *et al.*, 2012). O mapa geológico foi elaborado a partir da interpretação do mapa de litoestratigrafia, disponibilizado pela CPRM (2015), contendo 3 unidades litológicas: Complexo São Caetano (NP1sca), Formação Serra dos Martins (Ensm) e Suíte intrusiva Itaporanga (NP3□2it25).

Uso e cobertura do solo: O efeito da cobertura do solo na potencialidade ao movimento de massa envolve aspectos de estabilização mecânica devido à presença de raízes, depleção da umidade do solo pela transpiração, sobrecarga do peso das árvores e quebra-vento (ZHANG *et al.*, 2016). Para foi usado o Produto III do Projeto de Diagnóstico Geoambiental Integrado do Município de Areia, Paraíba, cujo objetivo é Caracterização do Uso e Cobertura da terra no município.

Distância para estrada: As atividades humanas, como construção de edifícios, escavações, construção de túneis e estradas têm impactos negativos na estabilidade de taludes devido ao efeito de corte de talude, resultando no aumento do nível de tensão cisalhante no maciço (FAN *et al.*, 2017). Considerando as regiões próximas as estradas como mais críticas, o mapa de distância para estradas foi elaborado utilizando a Base de Faces de Logradouros, da base de dados do IBGE

como referência (IBGE, 2021). Alguns ajustes manuais foram necessários, sendo utilizado o “*Google Earth pro*” para modelagem.

Distância para drenagem: A existência de corpos d’água próximo de encostas pode afetar negativamente a estabilidade, devido ao processo de erosão e a presença de umidade nos materiais que a compõe (ABAY; BARBIERI; WOLDEAREGAY, 2019). O mapa de distância para drenagem teve como referência o produto de Drenagem Principal do Brasil, da base de dados da AESA (2020).

Todos os mapas foram agrupados em um banco de dados em formato *raster*, convertidos para a mesma escala e resolução espacial e serviram de base para a análise espacial multicritério desta pesquisa. A Figura 3 apresenta os mapas gerados.

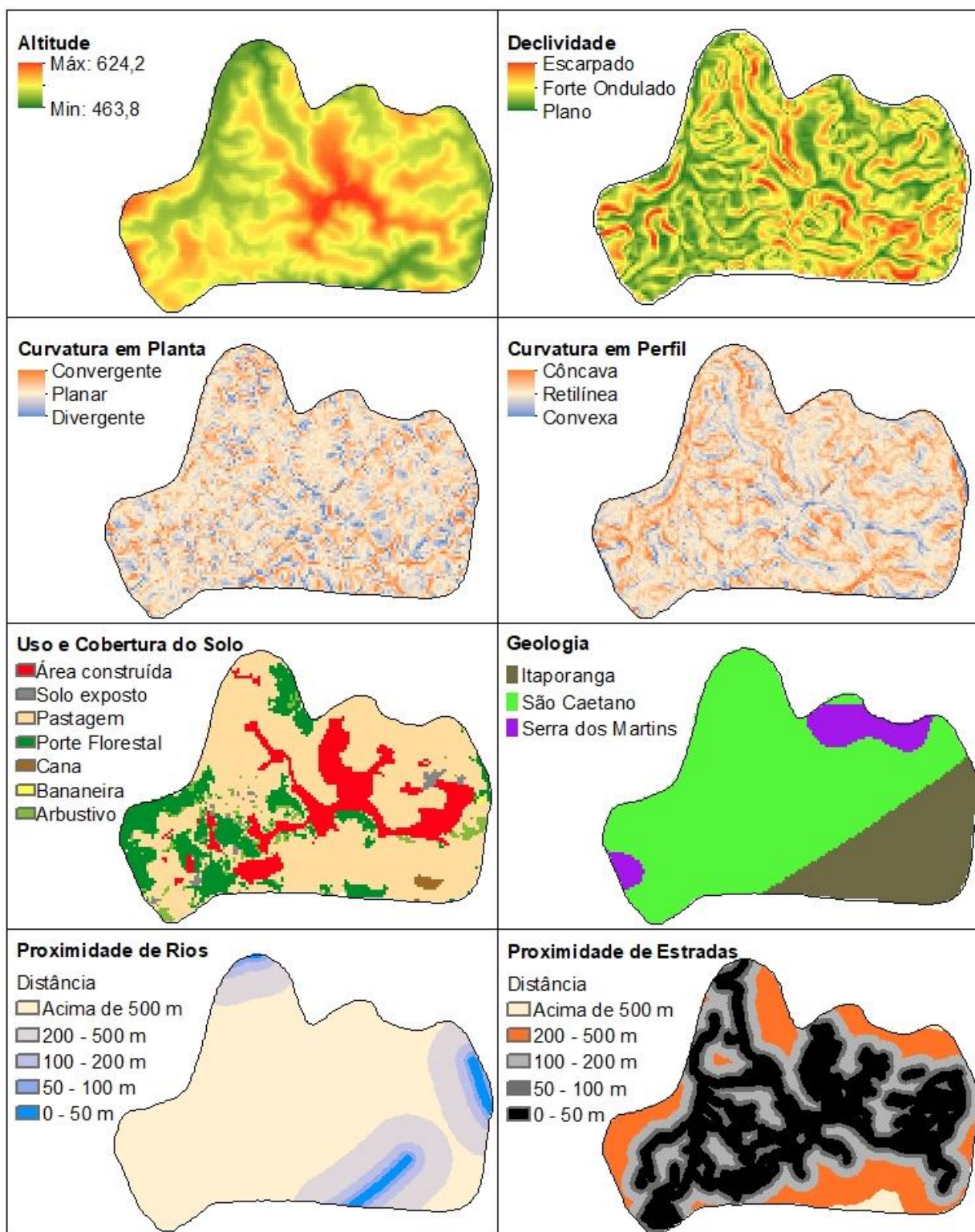


Figura 3 – Mapas temáticos.
 Fonte: Autores (2023).

2.3 Pesquisa de campo

Como não existem dados oficiais a respeito das ocorrências de movimentos de massa, essa informação foi levantada por meio de pesquisas de campo, com o apoio da Secretaria do Meio Ambiente da Prefeitura Municipal de Areia (PB), que forneceu recurso para as visitas aos locais críticos, com base nas queixas e denúncias da própria população. Os objetivos principais desta pesquisa foram mapear esses os pontos de instabilização e entender se os fatores selecionados eram representativos para aquela região.

As coordenadas longitudinais e latitudinais dos locais dos eventos foram obtidas com uso de um GPS e, posteriormente, levados ao “*Google Earth Pro*”, através da função “Adicionar marcador”, para facilitar a identificação dos pontos. As áreas que se apresentaram inacessíveis para obtenção das coordenadas, foram adquiridas por observação e trabalho manual no software supracitado.

A pesquisa de campo também forneceu subsídio para elaboração da matriz AHP, no que se refere a valoração dos critérios de instabilidade, anteriormente mencionados. Dessa forma, foram analisados os pontos de ocorrência dos movimentos de massa relacionando-os com as condições topográficas, geológicas e antrópicas nas respectivas áreas, com a finalidade de identificar os fatores que mais influenciam nos desastres.

2.4 Aplicação da metodologia AHP - Julgamentos

Estando definida a estruturação do problema, realizam-se os julgamentos comparativos, os quais foram realizados pela autora do trabalho em consenso com outros 3 especialistas na área, baseado na experiência de outros estudos de movimentos de massa e no conhecimento do município em estudo. As comparações empregaram a escala de Saaty (1990), onde se utiliza valores de 1 a 9 nas comparações pareadas dos indicadores, com 1 significando o mesmo grau de importância de um critério em relação ao outro, e 9 significando a extrema importância de um critério sobre outro. Denomina-se Escala Fundamental de Saaty, e é mostrada na Tabela 1.

Tabela 1 – Escala de julgamento de importância no Método AHP.

| Valores numéricos | Termos verbais | Explicação |
|-------------------|------------------------------------|--|
| 1 | Igual importância | Dois alternativas contribuem igualmente para o objetivo |
| 3 | Moderadamente mais importante | Experiência e julgamento favorecem levemente uma alternativa em relação a outra |
| 5 | Fortemente mais importante | Experiência e julgamento favorecem fortemente uma alternativa em relação a outra |
| 7 | Muito fortemente mais importante | Alternativa fortemente favorecida em relação a outra e sua dominância é demonstrada na prática |
| 9 | Extremamente mais importante | A evidência favorece uma alternativa em relação a outra, com grau de certeza mais elevado |
| 2,4,6,8 | Valores importantes intermediários | Quando se procura uma condição intermediária entre duas definições |

Fonte: Adaptado de Saaty (1990).

Dessa forma, foi elaborada uma matriz de comparação pareada, respondendo à pergunta: “quando consideramos dois elementos, *i* no lado esquerdo da matriz e *j* no topo, qual entre eles satisfaz mais o critério, ou seja, qual é considerado mais importante sob este critério, e, com que intensidade?”. A Tabela 2 apresenta o resultado dos julgamentos paritários.

Tabela 2 – Matriz de Comparação Pareada.

| | USO SOLO | DECLIVIDADE | ESTRADAS | GEOLOGIA | CURV PERFIL | CURV PLANTA | DRENAGEM | ALTITUDE |
|-------------|----------|-------------|----------|----------|-------------|-------------|----------|----------|
| USO SOLO | 1,00 | 2,00 | 2,00 | 3,00 | 3,00 | 4,00 | 5,00 | 7,00 |
| DECLIVIDADE | 0,50 | 1,00 | 2,00 | 3,00 | 3,00 | 3,00 | 4,00 | 7,00 |
| ESTRADAS | 0,50 | 0,50 | 1,00 | 3,00 | 4,00 | 4,00 | 4,00 | 5,00 |
| GEOLOGIA | 0,33 | 0,33 | 0,33 | 1,00 | 3,00 | 3,00 | 3,00 | 5,00 |
| CURV PERFIL | 0,33 | 0,33 | 0,25 | 0,33 | 1,00 | 3,00 | 3,00 | 5,00 |
| CURV PLANTA | 0,25 | 0,33 | 0,25 | 0,33 | 0,33 | 1,00 | 3,00 | 3,00 |
| DRENAGEM | 0,20 | 0,25 | 0,25 | 0,33 | 0,33 | 0,33 | 1,00 | 3,00 |
| ALTITUDE | 0,14 | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,33 | 0,33 | 1,00 |

Fonte: Autores (2023).

A determinação de pesos para as classes dos indicadores se deu por meio da metodologia utilizada por Meirelles *et al* (2017), onde os dados matriciais foram reclassificados em uma escala que varia de 1 a 5 (1: muito baixo, 2: baixo, 3: médio, 4: alto e 5: muito alto), em ordem crescente de importância e influência. Estas notas representam os valores em cada classe dos planos de informação e foram definidas a partir das análises dos locais de movimentos de massa.

Após a comparação par-a-par, é executada a etapa de síntese de prioridades, cujo objetivo é determinar um conjunto de pesos relativos, que é o autovetor normalizado dos elementos da matriz. Embora diferentes métodos tenham sido usados para derivar as prioridades, emprega-se a técnica de autovalor para calcular os pesos, que é um dos mais comuns:

- Somar os valores em cada coluna da matriz recíproca;
- Dividir cada elemento na matriz pelo total de sua coluna (a matriz resultante é chamada de matriz de comparação de pares normalizada e a soma de cada coluna é 1);
- Calcular a média dos elementos em cada linha da matriz normalizada, ou seja, dividir a soma das pontuações normalizadas de cada linha pelo número de critérios. Essas médias fornecem uma estimativa dos pesos relativos dos critérios que estão sendo comparados.

Dessa forma, após com os julgamentos realizados, obtém-se a matriz de normalização e, posteriormente, o autovetor, que representa a importância dos critérios. O resultado é apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Matriz Normalizada e autovetor correspondente.

| | USO SOLO | DECLIVIDADE | ESTRADAS | GEOLOGIA | CURV PERFIL | CURV PLANTA | DRENAGEM | ALTITUDE | AUTOVETOR |
|-------------|----------|-------------|----------|----------|-------------|-------------|----------|----------|--------------|
| USO SOLO | 0,307 | 0,404 | 0,318 | 0,268 | 0,202 | 0,214 | 0,214 | 0,194 | 0,265 |
| DECLIVIDADE | 0,153 | 0,202 | 0,318 | 0,268 | 0,202 | 0,161 | 0,171 | 0,194 | 0,209 |
| ESTRADAS | 0,153 | 0,101 | 0,159 | 0,268 | 0,269 | 0,214 | 0,171 | 0,139 | 0,184 |
| GEOLOGIA | 0,102 | 0,067 | 0,053 | 0,089 | 0,202 | 0,161 | 0,129 | 0,139 | 0,118 |
| CURV PERFIL | 0,102 | 0,067 | 0,040 | 0,030 | 0,067 | 0,161 | 0,129 | 0,139 | 0,092 |
| CURV PLANTA | 0,077 | 0,067 | 0,040 | 0,030 | 0,022 | 0,054 | 0,129 | 0,083 | 0,063 |
| DRENAGEM | 0,061 | 0,051 | 0,040 | 0,030 | 0,022 | 0,018 | 0,043 | 0,083 | 0,043 |
| ALTITUDE | 0,044 | 0,040 | 0,032 | 0,018 | 0,013 | 0,018 | 0,014 | 0,028 | 0,026 |

Fonte: Autores (2023).

Por fim, para analisar a integridade, qualidade e coerência dos julgamentos é realizada a análise de sensibilidade. Saaty propôs o seguinte procedimento:

- a) Cálculo do autovalor máximo (λ máx), cujo resultado deve ser igual ou muito próximo ao número de linhas (ou colunas) da matriz de comparações paritárias n para que a matriz de comparação seja considerada consistente.

$$\lambda \text{ máx} = \sum t \times w$$

onde T é o autovetor normalizado e, w corresponde a soma das colunas da matriz de comparações para cada critério.

- b) Cálculo o Índice de Consistência (IC), que indica quanto o autovalor calculado difere do valor teórico esperado

$$IC = \frac{\lambda \text{ máx} - n}{n - 1}$$

- c) Cálculo da Razão de Consistência (RC), cujo resultado não deve ultrapassar a faixa de 0,1, para matrizes maiores que 5x5.

$$RC = \frac{IC}{CA}$$

onde, o valor CA (Índice de Consistência Aleatória) é extraído da Tabela 4:

Tabela 4 – Índice de Consistência Aleatória.

| N | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|---------------------------------------|----|----|------|-----|------|------|------|------|------|------|
| Índice de Consistência Aleatória (CA) | 00 | 00 | 0,58 | 0,9 | 1,12 | 1,24 | 1,32 | 1,41 | 1,45 | 1,49 |

Fonte: Saaty (1980).

2.5 Álgebra de mapas

Esta etapa consiste na sobreposição dos mapas de critérios, considerando sua respectiva importância, dada pelo método AHP. O valor espacial de cada célula da área mapeada foi calculado multiplicando os pesos dos critérios pelos pesos do respectivo sub-critério. Dessa forma foi obtido o Índice de Suscetibilidade, como demonstra a equação:

$$IS = \sum p_n \times x_n$$

Onde, IS = Índice de Suscetibilidade; p_n = peso do critério n; x_n = nota do sub-critério, respectivo ao critério n.

Por fim, o mapa foi reclassificado em cinco classes de suscetibilidade, desde muito baixa a muito alta suscetibilidade

3. Resultados e discussão

3.1 Análise geambiental do município

O município de Areia (PB) está situado no início do Planalto da Borborema, região tipicamente com altitudes elevadas. As construções do centro urbano se posicionam nas regiões mais altas, acerca de 568 m, propagando-se para os abismos do entorno, onde predominam as formações natural arbustivas. A cidade apresentou relevo fortemente ondulado em, aproximadamente, 42% de toda a sua extensão, com algumas áreas apresentando relevo montanhoso. Próximo ao centro urbano, encontram-se as encostas do balneário “O Quebra” com vertentes atingindo cerca de 70% de inclinação.

Nas áreas de maior altitude do município predominam o perfil retilíneo-convexo, onde escoamento superficial diverge. As áreas mais baixas apresentam curvatura côncava, potencializando o acúmulo de umidade encosta abaixo. Assim como as áreas divergentes foram observadas, em sua maioria, nas encostas dos planaltos, as áreas convergentes são visualizadas nas áreas deprimidas.

Mesmo com área urbana em evidência, as áreas de pastagens predominam, compostos por arbustos de baixo e médio porte. A vegetação florestal, constituída por parcela de vegetação úmida e densa, também são representativas. Vale ressaltar que a remoção da proteção vegetal pode favorecer o movimento de massa, iniciando processos de erosão. Da mesma forma ocorre com a construção de estradas, cuja remoção de material de base dos taludes é danosa, tanto nas áreas de montante quanto jusante. Em contrapartida, encontrou-se pouca influência de fatores hidrológicos, como rios e córregos.

A unidade litológica NP1sca (Complexo São Caetano) é predominante na área, compreendendo uma sequência metassedimentar e metavulcanoclástica. As variações litológicas se mostram como uma condicionante fundamental para estudos de suscetibilidade, por causarem uma diferença na resistência e permeabilidade das rochas e solo. No entanto, se utilizada como um dado geológico isolado, mostra-se insuficiente para uma avaliação com esse viés.

3.2 Trabalhos de campo – Inventário

A partir da pesquisa de campo, constatou-se a grande fragilidade geomorfológica da paisagem do município, constituído por terrenos bastante íngremes, elevadas altitudes e uma grande parcela de solo exposto. Foi observada a existência de construções muito precárias, sem saneamento, localizadas ao longo das encostas, muros de arrimo improvisado, com sinais de deterioração, soluções de contenção que não atendem as especificações técnicas, além da falta de consciência da própria população que, certamente, por não terem ciência dos condicionantes dos movimentos de massa, promovem medidas inadequadas, atuando e intensificando, sobretudo, os processos de erosão do solo. Parte desses problemas são frutos da inexistência de um plano diretor, que forneça diretrizes à população, delimitando áreas impróprias para ocupação.

Por meio da pesquisa de campo, foram identificados 24 pontos de instabilidade dentro da área urbana, assim como a presença de feições de instabilidade. A Figura 4 mostra a localização desses pontos.

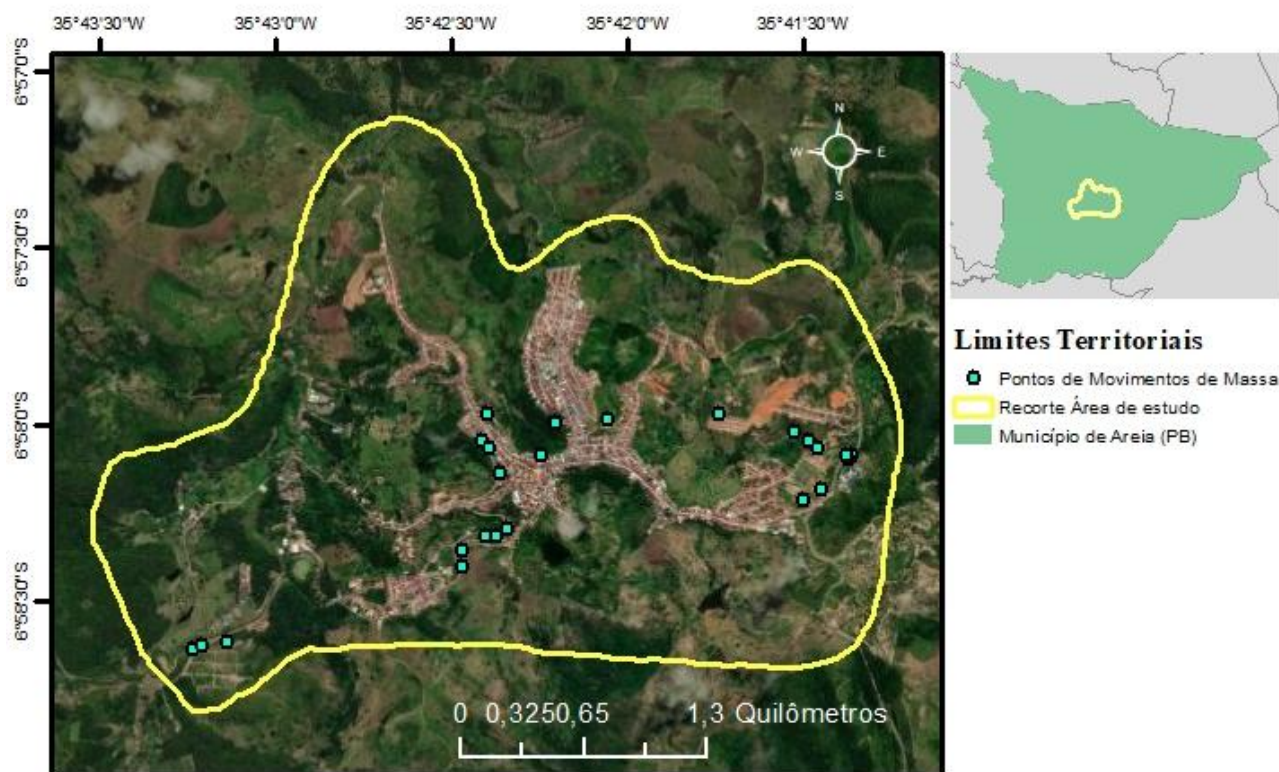


Figura 4 – Pontos de movimentos de massa mapeados.
Fonte: Autores (2023).

Fazendo uma correlação entre os parâmetros de controle e a distribuição dos eventos, notou-se que a maior influência foi dos critérios de Estradas, Geologia, Cobertura, Altitude e Declividade.

3.3 Matriz de Decisão AHP

Após os julgamentos comparativos, seguida das operações de normalização da matriz, obteve-se os pesos relativos para cada critério. Assim como para os subcritérios, onde foram atribuídas notas, com base na avaliação das condições dos locais de instabilidade, levantados na pesquisa de campo. O resultado é apresentado na Tabela 3.

Tabela 4 – Resultados dos julgamentos dos critérios e sub-critérios.

| INDICADORES | PESOS (%) | CLASSES | NOTAS |
|-------------------------|-----------|-------------------------|-------|
| Uso e cobertura do solo | 26,5 | 1 – Vegetação Florestal | 1 |

| | | | |
|-------------|------|------------------------------------|---|
| | | 2 – Vegetação Arbustiva | 2 |
| | | 3 – Cultura Banana | 1 |
| | | 4 – Cultura Cana | 1 |
| | | 5 – Pastagem | 5 |
| | | 6 – Solo Exposto | 1 |
| | | 7 – Área urbanizada | 4 |
| Declividade | 20,9 | 1 – Plano (0 a 3%) | 1 |
| | | 2 – Suave Ondulado (3 a 8%) | 2 |
| | | 3 – Ondulado (8 a 20%) | 3 |
| | | 4 – Fortemente ondulado (20 a 45%) | 5 |
| | | 5 – Montanhoso (45 a 75%) | 3 |
| | | 6 – Escarpado (Acima de 75%) | 1 |
| Estradas | 18,4 | 1 – Até 30m | 5 |
| | | 2 – 30 a 60m | 4 |
| | | 3 – 60 a 120m | 1 |
| | | 4 – 120 a 240m | 1 |
| | | 5 – Acima de 240m | 1 |
| Geologia | 11,8 | 1 – São Caetano | 5 |
| | | 2 – Itaporanga | 3 |
| | | 3 – Serra dos Martins | 1 |
| Perfil | 9,2 | 1 – Convexa | 3 |
| | | 2 – Retilínea | 2 |
| | | 3 – Côncava | 5 |
| Planta | 6,3 | 1 – Divergente | 5 |
| | | 2 – Planar | 2 |
| | | 3 – Convergente | 3 |
| Drenagem | 4,3 | 1 – Até 30m | 1 |
| | | 2 – 30 a 60m | 1 |
| | | 3 – 60 a 120m | 1 |
| | | 4 – 120 a 240m | 4 |
| | | 5 – Acima de 240m | 5 |
| Altitude | 2,6 | 1 – 463 a 495 m | 1 |
| | | 2 – 495 a 527 m | 2 |
| | | 3 – 527 a 560 | 5 |
| | | 4 – 560 a 592 | 4 |
| | | 5 – Acima de 592m | 3 |

Fonte: Autores (2023).

O resultado corrobora com a análise de Zang *et al.* (2016), cujo critério “Uso do solo” foi o mais representativo, em uma análise comparativa com outros 7 critérios. Sua pesquisa apontou a importância da cobertura do solo nas falhas de taludes, dado que a ocorrência de deslizamentos foi maior nas zonas de assentamento do que em áreas de florestas densas. Vale destacar a semelhança da ocupação do solo da área de estudo do autor com Areia (PB), onde o crescimento populacional resultou na construção de assentamentos e serviços públicos nas áreas de encostas.

Fazendo a mesma análise para o critério “Declividade”, Kristanto *et al.* (2020) também identificaram que as áreas com alto potencial de movimentos de massa são controladas, em sua maioria, por este critério, admitindo que encostas com ângulo de inclinação consideravelmente íngreme, está em maior risco de ocorrência de movimentação.

Mezughli *et al.* (2012) afirma que as “Estradas” são consideradas um dos fatores mais importantes no controle de estabilidade de encostas. O autor observou que muitos locais de movimentação ocorreram próximo às obras de construção de rodovias, devido a extração de material na porção inferior dos taludes, retirando o apoio do maciço de solo.

O fator geológico, geralmente, figura como fator importante na influência dos movimentos (SAADATKHAH, KASSIM e LEE, 2014; PARK *et al.*, 2012), especialmente unidades geológicas compostas por camadas de solo

intemperizados. Embora a maioria dos deslizamentos ocorrerem em apenas uma unidade geológica, Complexo São Caetano, observa-se que esta é uma unidade que compreende quase toda extensão da área, não havendo parâmetro de comparação.

Assim como na análise de Bezerra (2019), é possível perceber que os resultados dos pesos dos indicadores de morfologia da encosta, em planta e em perfil, apresentaram desempenho muito similar no favorecimento à ocorrência de movimentos de massa, além de representarem pouca influência nos movimentos de massa. Em geral, a curvatura do relevo é melhor interpretada quando associado a condições hidrológicas, visto que o escoamento superficial acompanha a geometria da encosta.

Fan *et al.* (2017) mostrou que a maioria dos pontos de instabilização da sua área de estudo ocorreu próximo aos córregos, por causarem a saturação do material na base do talude. Em contrapartida, o parâmetro hidrológico em Areia (PB) foi pouco representativo, já que poucos pontos foram observados nas proximidades dos rios.

O critério “Amplitude”, de forma análoga à análise de Abay *et al.* (2019), se mostrou ser pouco preponderante nas falhas de taludes, em comparação com outros 6 critérios. Este resultado, se deu especialmente porque a variação na altitude pode estar relacionada a ocorrência de diferentes dinâmicas ambientais, como tipos de vegetação e precipitação.

A análise de sensibilidade mostra a coerência quanto aos julgamentos realizados pelos especialistas. Na tabela 5 é apresentado o resultado desta análise para a matriz recíproca.

Tabela 5 – Análise de sensibilidade.

| Ordem da Matriz | 8 |
|---------------------------------------|-------|
| Autovalor máximo (λ máx.) | 8,858 |
| Índice de Consistência Aleatória (CA) | 1,4 |
| Índice de Consistência (IC) | 0,123 |
| Razão de Consistência (RC) | 8,8 % |

Fonte: Autores (2023).

O resultado da Razão de Consistência (RC), foi inferior a 10% (8,8%) conforme recomenda a metodologia AHP proposta por Saaty, representando um nível de consistência aceitável nas comparações realizadas. Outro indicativo de coerência nos julgamentos realizados pelos especialistas é a aproximação do valor do autovalor máximo (λ máx) à ordem da matriz de comparação.

3.4 Mapa de suscetibilidade a movimentos de massas na área urbana de Areia-PB

Posteriormente à atribuição das notas e pesos referentes a cada plano de informação, foi realizada a álgebra de mapas, onde se sobrepõem os mapas temáticos multiplicando os respectivos pesos de cada critério. Com a geração do mapa final de suscetibilidade, realizou-se uma reclassificação, onde o dado matricial resultante foi dividido em cinco intervalos, variando o grau desde baixa a muito alta de suscetibilidade. A Figura 5 apresenta o resultado da sobreposição.

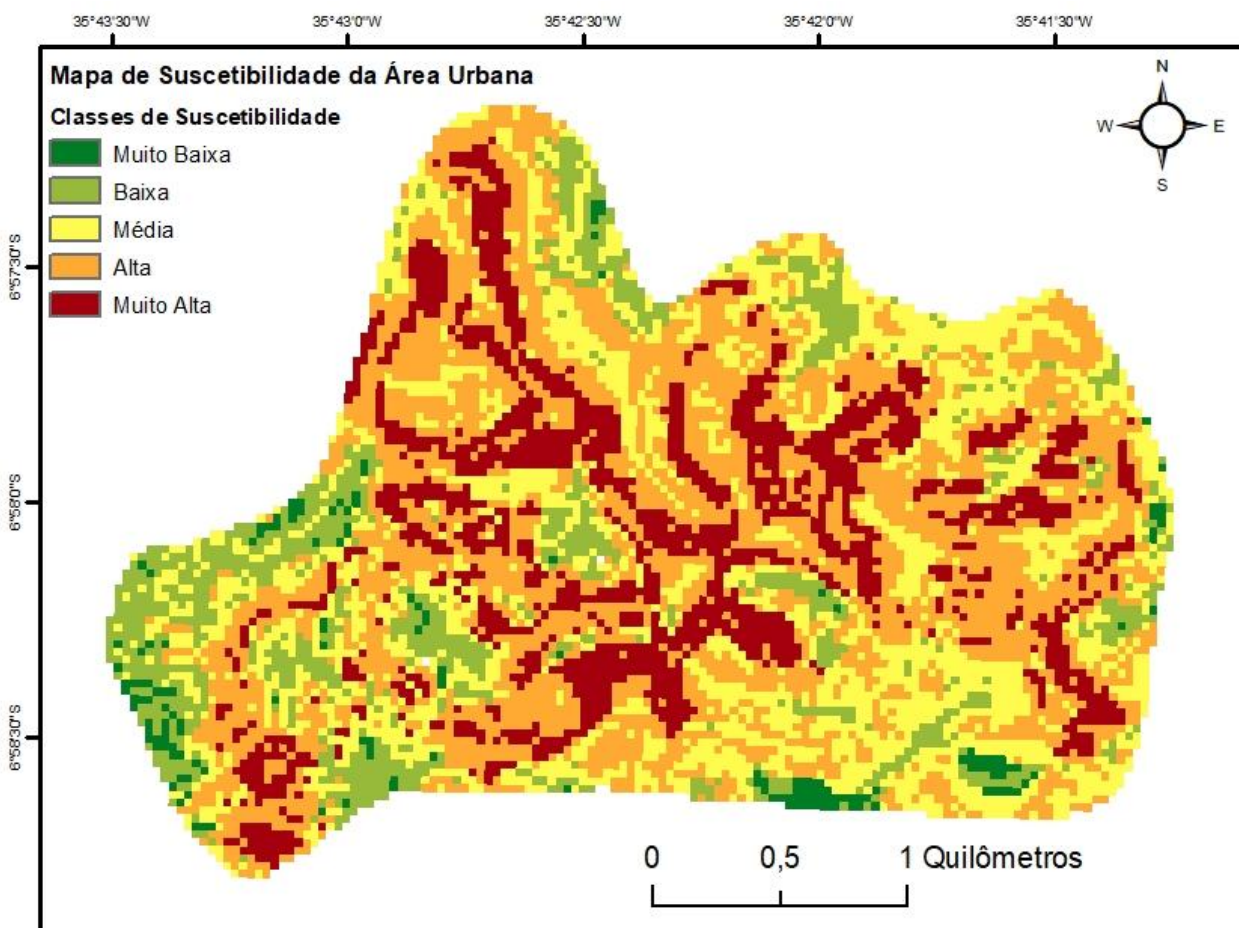


Figura 5 – Mapa de suscetibilidade a movimentos de massa.

Fonte: Autores (2023).

3.5 Validação dos resultados

Relacionando os graus de suscetibilidade com a localização dos pontos de ocorrências de movimentos de massa no mapa final de suscetibilidade, nota-se que, a maior parte destes eventos, se localizam na classe “Muito alta” (58,3%), onde, somando com a classe “Alta”, atingem aproximadamente 91% do total. Estes resultados são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Ocorrências de movimentos de massa por classes de suscetibilidade.

| Graus de Suscetibilidade | Área (%) | Ocorrências mapeadas | % |
|--------------------------|--------------|----------------------|--------------|
| Muito Baixa | 2,1 | 0 | - |
| Baixa | 12,8 | 0 | - |
| Média | 27,6 | 2 | 8,3 % |
| Alta | 38,3 | 8 | 33,4% |
| Muito Alta | 19,2 | 14 | 58,3% |
| TOTAL | 100 % | 24 | 100 % |

Fonte: Autores (2023).

Fazendo uma análise comparativa do mapa de suscetibilidade da área urbana do município de Areia (PB) com as áreas de risco identificadas pela CPRM (2015), constata-se que as quatro áreas descritas pela companhia estão inseridas nas

áreas de “Alta” e “Muito Alta” suscetibilidade, apresentando potencial para instabilidades, o que agrega confiabilidade ao mapa apresentado.

4. Considerações finais

Esta pesquisa mapeou a suscetibilidade a movimentos de massa do município de Areia (PB), por meio de uma análise multicritério realizada em software SIG. O mapa de suscetibilidade elaborado mostra os pontos críticos do município conforme os parâmetros de controle escolhidos e verificados *in loco*. Este tipo de abordagem integrada desempenha um papel crucial na gestão urbanística dos municípios e pode funcionar como um subsídio para o planejamento da prevenção e recuperação da área atingida pelos movimentos de massa.

A aplicação da análise multicritério através da AHP no estudo da suscetibilidade a movimentos de massa possibilitou resultados satisfatórios, gerando um mapa coerente com o que fora observado nas pesquisas de campo, bem como nos trabalhos realizados no município e nas diversas bibliografias utilizadas. Apesar da baixa disponibilidade de informações precisas e banco de dados oficiais, este estudo pode apoiar as decisões necessárias para direcionar a correta gestão urbanística, priorizando intervenções de forma a reduzir o risco e evitar transtornos causados por episódios de movimentos de massa.

Ressalta-se a análise cautelosa e personalizada para cada área de estudo em conjunto com o estudo do inventário. Os movimentos de massa são influenciados por vários fatores, muitas vezes conflitantes, os quais variam significativamente de um lugar para outro. Assim, a seleção e avaliação adequada dos fatores condicionantes para o uso na AHP é essencial para esta temática, uma vez que cada área de estudo possui particularidades, dada a variação dos locais das ocorrências. É importante entender, para além dos fatores que fazem parte do processo de instabilização, o grau de influência de cada um.

Ainda que se constate a eficácia dos resultados alcançados, é importante destacar a necessidade de novos estudos, bem como, o emprego de metodologias mais modernas que podem quantificar com maior acurácia a potencialidade dos processos de instabilização de solo. Com isso, destaca-se a importância do poder público em aprimorar o banco de dados de inventário, incentivando a participação da população, para auxiliar no melhor entendimento dos parâmetros de controle das ocorrências, gerando resultados mais confiáveis e capazes de fornecer melhores previsões sobre as distribuições espaciais das ocorrências de movimentos de massa na área de estudo.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq e à FAPESQ, pela concessão das bolsas de estudo de mestrado, bem como à Prefeitura Municipal de Areia (PB) e à equipe do Secretaria do Meio Ambiente.

Referências

- Abay, A.; Barbieri, G.; Woldearegay, K. GIS-based Landslide Susceptibility Evaluation Using Analytical Hierarchy Process (AHP) Approach: the case of tarmaber district, ethiopia. *Momona Ethiopian Journal Of Science*, v. 11, n. 1, p. 14, 30 maio 2019. African Journals Online (AJOL). <https://dx.doi.org/10.4314/mejs.v11i1.2>.
- Achour, Y.; Pourghasemi, H. R. How do machine learning techniques help in increasing accuracy of landslide susceptibility maps? *Geoscience Frontiers*, v. 11, n. 3, p. 871-883, maio 2020. Elsevier BV. <https://dx.doi.org/10.1016/j.gsf.2019.10.001>.
- Andrade, Leonaldo Alves De.; Machado, Célia C. Clemente. Caracterização do Uso e Cobertura da Terra no município de Areia-PB. 2018. Disponível em: <https://www.cca.ufpb.br/cca/contents/menu/institucional/diagnostico-geoambiental-integrado-do-municipio-de-areia>. Acesso em: janeiro, 2023.
- AESA - Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba. *Meteorologia – chuvas – gráfico. Município: Areia*. 2023. Disponível em: https://www.aesa.pb.gov.br/aesa-website/meteorologia-chuvas-grafico/?id_municipio=15&date_chart=2021-09-24&period=year. Acesso em: Abril, 2023.
- AESA - Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba. *Rios da Paraíba*. 2020. Disponível em: <https://geoserver.aesa.pb.gov.br/geoprocessamento/geoportal/shapes.html>. Acesso em: Abril, 2023.

- Bahrami, Y.; Hassani, H.; Maghsoudi, A. Landslide susceptibility mapping using AHP and fuzzy methods in the Gilan province, Iran. *Geojournal*, v. 86, n. 4, p. 1797-1816, 18 fev. 2020. Springer Science and Business Media LLC. <https://dx.doi.org/10.1007/s10708-020-10162-y>.
- BEZERRA, Laddyla Thuanny Vital. *Mapeamento de risco e análise de estabilidade de movimentos de massa na comunidade São José do Jacó, Natal/RN*. 2019. 337f.: il. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Natal, 2019.
- BEZERRA, L. T. V.; FREITAS NETO, O. de; SANTOS Jr., O.; MICKOVSKI, S. Landslide Risk Mapping in an Urban Area of the City of Natal, Brazil. *Sustainability* (2020), 12, 9601; <https://doi:10.3390/su12229601>
- CHANU, M.L., BAKIMCHANDRA, O. Landslide susceptibility assessment using AHP model and multi resolution DEMs along a highway in Manipur, India. *Environ Earth Sci* 81, 156 (2022). <https://doi-org.ez292.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s12665-022-10281-4>.
- COSTA, Ozana da Silva. *A ocupação nas encostas do balneário “O Quebra” – Areia-PB*. 2012. 57 f.: il. Color. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Geografia) – Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Educação, 2012.
- CPRM. *Ação emergencial para delimitação de áreas em alto e muito alto risco a inundações e movimentos de massa: Areia, PB*. In: ELLDORF, B.; MELO, R. C. de. (Org.) Recife: 2015. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/19743>. Acesso em: setembro, 2022.
- CPRM. *Mapa Geodiversidade do Estado da Paraíba*. Organizadores: Fernanda Soares de Miranda Torres, Edlene Pereira da Silva. CPRM: 2016. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/14706>. Acesso em: novembro, 2022.
- Embrapa - Empresa Brasileira De Pesquisa Agropecuária. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos (Rio de Janeiro, RJ). *Súmula da 10. Reunião Técnica de Levantamento de Solos*. Rio de Janeiro, 1979. 83p. (EMBRAPA-SNLCS. Micelânea, 1).
- ESA - EUROPEAN SPACE AGENCY. *Copernicus DEM*. Disponível em: <https://panda.copernicus.eu/>. Acesso em: 22 set. 2022.
- Fan, W.; Wei, X.S.; Cao, Y.; Zheng, B. Landslide susceptibility assessment using the certainty factor and analytic hierarchy process. *Journal Of Mountain Science*, v. 14, n. 5, p. 906-925, maio 2017. Springer Science and Business Media LLC. <https://dx.doi.org/10.1007/s11629-016-4068-2>.
- FARIA, D. G. M. *Mapeamento de perigo de escorregamentos em áreas urbanas precárias brasileiras com a incorporação do Processo de Análise Hierárquica (AHP)*. São Carlos, 2011. Tese (Doutorado em Geotecnia). Programa de Pós-Graduação e Área de concentração em Geotecnia – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.
- GALINDO, A. C. et al. Química mineral de anfibólios e biotitas da suíte básico intermediária da faixa seridó-FSE da Província Borborema, NE do Brasil S15-293. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 2006, Aracajú. Anais... Aracajú: [s.n.], 2006.
- GERSCOVICH, Denise M. S. *Estabilidade de taludes*. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2016
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (Brasil). *Cidades – Panorama: Areia [2501104], PB*. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pb/areia/panorama>. Acesso em: março, 2023
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (Brasil). *Base de Faces de Logradouros do Brasil*. 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/28971-base-de-faces-de-logradouros-do-brasil.html>. Acesso em: 19 mar. 2023.
- Kamp, U.; Growley, B. J.; Khattak, G. A.; Owen, L. A. GIS-based landslide susceptibility mapping for the 2005 Kashmir earthquake region. *Geomorphology*, v. 101, n. 4, p. 631-642, nov. 2008. Elsevier BV. <https://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.03.003>.

- Kristanto, W. A. D.; Kusumayudha, S. B.; Purwanto, H. S.; Nugroho, N. E.; Khafid, M. A. Correlation of the hydrogeological systems and landslide potential in the Northern Menoreh Hills, Purworejo Regency, Central Java, Indonesia. 2Nd International Conference On Earth Science, Mineral, And Energy, jul. 2020. *AIP Conference Proceedings*. <https://dx.doi.org/10.1063/5.0010170>.
- LIRA, B. S. Estudo das características geotécnicas e análise de estabilidade de taludes de solos residuais em Areia-PB. 2022. 204 f. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia Civil e Ambiental, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2022.
- Lira, B. S.; Sousa, M. N. De M.; Santos Jr., O. F.; Silvani, C.; Nóbrega, E. R.; Santos, G. C. Mass movements in the Northeast region of Brazil: a systematic review. *Soils and Rocks* 43(4): 549-565 (2020). <https://doi.org/10.28927/SR.434549>
- Marques, A. L.; Barbosa, E. S.; Ribeiro, J. K. N.; Coelho, E. S.; Barbosa, E. T. G. Paisagem urbana, vulnerabilidade e risco em brejos de altitude: o sítio urbano de Areia/PB. *Nature and Conservation*, v.10, n.2, p.25-34, 2017. DOI: <https://doi.org/10.6008/SPC2318-2881.2017.002.0003>.
- Meirelles, E. De O.; Dourado, F.; Costa, V. C. Da. Análise Multicritério para Mapeamento da Suscetibilidade a Movimentos de Massa na Bacia do Rio Paqueta-Rj. *Geo Uerj*, n. 33, p. 1-22, 31 dez. 2018. Universidade de Estado do Rio de Janeiro. <https://dx.doi.org/10.12957/geouerj.2018.26037>.
- Mezugh, T. H. Et Al. Analytical Hierarchy Process Method for Mapping Landslide Susceptibility to an Area along the E-W Highway (Gerik-Jeli), Malaysia. *Asian Journal Of Earth Sciences*, v. 5, n. 1, p. 13-24, 15 dez. 2011. Science Alert. <https://dx.doi.org/10.3923/ajes.2012.13.24>.
- Nascimento, R. R. Do; Marques, E. A. G.; Simões, G. F. Application of the AHP method for prioritizing actions to reduce risk associated with gravitational mass movements in areas along the margins of watercourses of the city of Rio Branco, Brazil. *Natural Hazards* 116, p. 1591-1613, 2023. Springer Science and Business Media LLC. <https://dx.doi.org/10.1007/s11069-022-05730-z>.
- Park, S.; Choi, C.; Kim, B.; Kim, J. Landslide susceptibility mapping using frequency ratio, analytic hierarchy process, logistic regression, and artificial neural network methods at the Inje area, Korea. *Environmental Earth Sciences*, v. 68, n. 5, p. 1443-1464, 9 ago. 2012. Springer Science and Business Media LLC. <https://dx.doi.org/10.1007/s12665-012-1842-5>
- Pradhan, A.M.S.; Kim, Y.T. Evaluation of a combined spatial multi-criteria evaluation model and deterministic model for landslide susceptibility mapping. *Catena*, v. 140, p. 125-139, maio 2016. Elsevier BV. <https://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2016.01.022>.
- Saadatkah, N.; Kassim, A.; Lee, L. M. Susceptibility Assessment of Shallow Landslides in Hulu Kelang Area, Kuala Lumpur, Malaysia Using Analytical Hierarchy Process and Frequency Ratio. *Geotechnical And Geological Engineering*, v. 33, n. 1, p. 43-57, 11 nov. 2014. Springer Science and Business Media LLC. <https://dx.doi.org/10.1007/s10706-014-9818-8>.
- SAATY, R.W. The analytic hierarchy process—what it is and how it is used. *Mathematical Modelling*, v. 9, n. 3-5, p.161-176, 1987. Elsevier BV. [https://dx.doi.org/10.1016/0270-0255\(87\)90473-8](https://dx.doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8).
- SAATY, Thomas L.. How to make a decision: The analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*, [s.l.], v. 48, n. 1, p.9-26, set. 1990. Elsevier BV. [https://dx.doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90057-i](https://dx.doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057-i).
- SAATY, Thomas L.. Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*, [s.l.], v. 1, n. 1, p.83-98, 2008. Inderscience Publishers. <https://dx.doi.org/10.1504/ijssci.2008.017590>.
- SANTOS, E. J. *O pluton granítico Lagoa das Pedras: acreção e colisão na região de floresta-Pernambuco Província da Borborema*. 1995. 220 f. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

SOUSA, M. N. de M. *Caracterização geotécnica dos solos de áreas de risco do município de Areia – PB*. 2020. 167 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2020.

ZHANG, G. et al. Integration of the Statistical Index Method and the Analytic Hierarchy Process technique for the assessment of landslide susceptibility in Huizhou, China. *Catena*, [S.L.], v. 142, p. 233-244, jul. 2016. Elsevier BV. <https://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2016.03.028>.