



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

BRUNA HÉLEN BRITO DE ARAÚJO

**MAPEAMENTO DE SUSCETIBILIDADE A MOVIMENTOS DE MASSAS NO
MUNICÍPIO DE AREIA-PB**

CAMPINA GRANDE – PB

2023

BRUNA HÉLEN BRITO DE ARAÚJO

**MAPEAMENTO DE SUSCETIBILIDADE A MOVIMENTOS DE MASSAS NO
MUNICÍPIO DE AREIA-PB**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, em cumprimento às exigências para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

Área de concentração: Geotecnia

Orientador: Prof. Dr. Olavo Francisco dos Santos Júnior

CAMPINA GRANDE – PB

2023

A663m Araújo, Bruna Hélen Brito de.
Mapeamento de suscetibilidade a movimentos de massas no município de Areia-PB / Bruna Hélen Brito de Araújo. – Campina Grande, 2023.
95 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2023.
"Orientação: Prof. Dr. Olavo Francisco dos Santos Júnior".
Referências.

1. Geotecnia. 2. Desastres Ambientais. 3. Geoprocessamento.
4. Multicritério. I. Santos Júnior, Olavo Francisco dos. II. Título.


CDU 624.13(043)

BRUNA HÉLEN BRITO DE ARAÚJO


**MAPEAMENTO DE SUSCETIBILIDADE A MOVIMENTOS DE MASSAS NO
MUNICÍPIO DE AREIA-PB**

Dissertação defendida e aprovada no dia 31 de agosto de 2023.


BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 OLAVO FRANCISCO DOS SANTOS JUNIOR
Data: 26/09/2023 17:33:05-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Olavo Francisco dos Santos Júnior (Orientador)
Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN

Documento assinado digitalmente
 ADRIANO ELISIO DE FIGUEIREDO LOPES LUCENA
Data: 27/09/2023 10:49:45-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena (Examinador Interno)
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

Documento assinado digitalmente
 BRUNA SILVEIRA LIRA
Data: 25/09/2023 17:09:31-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profª. Dra. Bruna Silveira Lira (Examinadora Externa)
Universidade Federal do Piauí (UFPI)



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
POS-GRADUACAO ENGENHARIA CIVIL AMBIENTAL
Rua Aprigio Veloso, 882, - Bairro Universitario, Campina Grande/PB, CEP 58429-900

REGISTRO DE PRESENÇA E ASSINATURAS

1. **ATA DA DEFESA PARA CONCESSÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**
2. **ALUNO(A): BRUNA HÉLEN BRITO DE ARAÚJO / COMISSÃO EXAMINADORA: DR. OLAVO FRANCISCO DOS SANTOS JUNIOR - PPGECA/UFCG (PRESIDENTE) - ORIENTADOR, DR. ADRIANO ELÍSIO DE FIGUEIREDO LOPES LUCENA - PPGECA/UFCG, DR.ª BRUNA SILVEIRA LIRA - UFPI - EXAMINADORA EXTERNA (PORTARIA 29/2023). / TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: "MAPEAMENTO DE SUSCETIBILIDADE A MOVIMENTOS DE MASSAS NO MUNICÍPIO DE AREIA-PB" / ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: GEOTECNIA / HORA DE INÍCIO: 14:30 HORAS / NA SALA 02 DO BLOCO CT, LABORATÓRIO DE PAVIMENTOS, CAMPUS SEDE DA UFCG, EM CAMPINA GRANDE, DE FORMA HÍBRIDA.**
3. **EM SESSÃO REALIZADA EM FORMATO HÍBRIDO, APÓS EXPOSIÇÃO DE CERCA DE 40 MINUTOS, O(A) CANDIDATO(A) FOI ARGUIDO(A) ORALMENTE PELOS MEMBROS DA COMISSÃO EXAMINADORA, TENDO DEMONSTRADO SUFICIÊNCIA DE CONHECIMENTO E CAPACIDADE DE SISTEMATIZAÇÃO NO TEMA DE SUA DISSERTAÇÃO, SENDO-LHE ATRIBUÍDA O CONCEITO "EM EXIGÊNCIA", SENDO QUE A POSSIBILIDADE DE APROVAÇÃO ESTÁ CONDICIONADA À AVALIAÇÃO DA NOVA VERSÃO DO TRABALHO FINAL, SEGUINDO PROCEDIMENTOS PREVISTOS NA RESOLUÇÃO DO PROGRAMA. O PRESIDENTE DA COMISSÃO EXAMINADORA, OUVIDOS OS DEMAIS MEMBROS, DEVERÁ FICAR RESPONSÁVEL POR ATESTAR QUE AS CORREÇÕES SOLICITADAS NA LISTA DE EXIGÊNCIAS FORAM ATENDIDAS NA VERSÃO FINAL DO TRABALHO. A COMISSÃO EXAMINADORA CUMPRINDO OS PRAZOS REGIMENTAIS, ESTABELECE UM PRAZO MÁXIMO DE 30 DIAS PARA QUE SEJAM FEITAS AS ALTERAÇÕES EXIGIDAS. APÓS O DEPÓSITO FINAL DO DOCUMENTO DE DISSERTAÇÃO, DEVIDAMENTE REVISADO E MEDIANTE ATESTADO DO ORIENTADOR, O CONCEITO "EM EXIGÊNCIA" PASSARÁ IMEDIATAMENTE PARA O DE "APROVADO". NA FORMA REGULAMENTAR, FOI LAVRADA A PRESENTE ATA, QUE É ASSINADA POR MIM, FLÁVIO PEREIRA DA CUNHA, SECRETÁRIO, ALUNO E OS MEMBROS DA COMISSÃO EXAMINADORA PRESENTES.**
4. **CAMPINA GRANDE, 31 DE AGOSTO 2023**
- 5.
- 6.
- 7.
8. _____
9. **BRUNA SILVEIRA LIRA - UFPI - EXAMINADORA EXTERNA**



Documento assinado eletronicamente por **Bruna Hélen Brito de Araújo, Usuário Externo**, em 01/09/2023, às 16:16, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Bruna Silveira Lira, Usuário Externo**, em 01/09/2023, às 16:30, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **ADRIANO ELISIO DE FIGUEIREDO LOPES LUCENA, CHEFE (A)**, em 01/09/2023, às 17:07, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **OLAVO FRANCISCO DOS SANTOS JÚNIOR, PROFESSOR**, em 01/09/2023, às 18:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **FLAVIO PEREIRA DA CUNHA, SECRETÁRIO (A)**, em 04/09/2023, às 07:38, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade>, informando o código verificador **3715456** e o código CRC **A03451CF**.

AGRADECIMENTOS

Ao meu Pai Celestial, por me permitir viver essa conquista, me concedendo sabedoria, paciência e toda força necessária para superar os desafios. À Ele, toda honra e glória;

Aos meus pais e toda minha família, que sempre me forneceram todo suporte para lutar pelos meus objetivos e por sempre apoiaram minhas decisões;

Aos meus irmãos, meus xodós nessa vida, pelos quais busco ser alguém melhor todos os dias, pessoal e profissionalmente;

Ao meu namorado Lucas, por todo apoio, paciência e carinho, nessa árdua caminhada que foi a conclusão do mestrado;

Ao meu orientador, professor Francisco Olavo, o qual tenho profunda admiração e respeito, pelo seu trabalho. Cada reunião virtual que tivemos foi um enorme aprendizado. Luto para que um dia eu possa ser 1% do profissional que ele é;

À Bruna Lira, que com sua inteligência, doçura e positividade, foi peça fundamental durante esta caminhada, muitas vezes abdicando do seu tempo para ajudar nesta pesquisa, além do suporte mental que me proporcionou;

Ao meu conterrâneo, colega de graduação e colega de mestrado Danylo, por compartilhar inúmeras experiências, satisfatórias e outras nem tanto, durante todo esse tempo;

Aos meus colegas de mestrado, por todas as experiências compartilhadas, mesmo que virtualmente,

Ao Professor Eduardo Medeiros e o técnico de laboratório Eudes Araújo, por me auxiliarem e acompanharem no estágio à docência;

À Prefeitura Municipal de Areia (PB) e a Secretaria Municipal de Meio Ambiente, na pessoa de Laís Barreto, se disponibilizou para ajudar nesta pesquisa, fornecendo todo subsídio necessários nas visitas;

Ao PPGECA, por me proporcionar todo o suporte necessário para a realização desse grande desejo em minha vida;

A FAPESQ, pela disponibilização da bolsa de estudo, cujo o apoio financeiro foi essencial para realização dessa pesquisa;

À todas as pessoas que, direta ou indiretamente, colaboraram com esta pesquisa, a minha profunda gratidão e meus votos de prosperidade.

RESUMO

Desastres em encostas urbanas brasileiras são consequências de um conjunto de fragilidades geomorfométricas, potencializados pela ação humana, os quais são responsáveis por danos e perdas substanciais. A identificação de áreas cuja dinâmica do meio físico favorece a instabilização do maciço de solo 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, uma área com histórico de movimentos de massa situada em uma região serrana do estado da Paraíba, esse estudo objetivou mapear as áreas mais suscetíveis a ocorrência de movimentos de massas em encostas através de um modelo baseado em SIG (Sistema de Informação Geográfica) e AHP (*Analytic Hierarchy Process*), tanto para o município inteiro como para um recorte do centro urbano, visto que são áreas já ocupadas pela população. Foram considerados 8 critérios mapeáveis para o estudo, incluindo a altitude, declividade, curvatura em planta e em perfil, uso e cobertura do solo, proximidade de estradas e proximidade de rios. Após a aplicação do método SIG-AHP, observou-se que os resultados foram compatíveis com o levantamento de dados, estudos prévios elaborados e registros históricos da cidade. Os critérios de Estradas, Geologia, Uso e Cobertura do Solo e Declividade foram os mais críticos nesta análise, obtendo maiores pesos relativo. No total, 57,5 % da área urbana está nas classes mais altas de suscetibilidade. Observou-se ainda que 91,7 % dos pontos de movimentos de massa mapeados durante os trabalhos de campo encontram-se nas áreas de maior suscetibilidade. Esse estudo pode ser considerado um potencial instrumento para gestão de uso e ocupação do solo para o município de Areia, bem como para cidades com problemas análogos.

Palavras-chave: Desastres ambientais, Multicritério, Geoprocessamento.

ABSTRACT

Disasters on Brazilian urban slopes are consequences of a set of geomorphometric weaknesses, enhanced by human action, which are responsible for substantial damage and losses. The identification of areas whose physical environment dynamics favor the instability of the soil mass is a subsidy for the planning and occupation of urban space. To achieve this, management units need reliable and optimized data for decision making. Given the conditions of the municipality of Areia, an area with a history of mass movements located in a mountainous region of the state of Paraíba, this study aimed to map the areas most susceptible to the occurrence of mass movements on slopes using a GIS-based model (Geographic Information System) and AHP (Analytic Hierarchy Process), both for the entire municipality and for a section of the urban center, as these are areas already occupied by the population. 8 mappable criteria were considered for the study, including elevations, slope, curvature in plan and profile, land use and cover, proximity to roads and proximity to rivers. After applying the GIS-AHP method, it was observed that the results were compatible with the data collection, previous studies carried out and historical records of the city. The criteria of Roads, Geology, Land Use and Cover and Slope were the most critical in this analysis, obtaining greater relative weights. In total, 57.5% of the urban area is in the highest susceptibility classes. It was also observed that 91.7% of the mass movement points mapped during fieldwork are in areas of greatest susceptibility. This study can be considered a potential instrument for managing land use and occupation for the municipality of Areia, as well as for cities with similar problems.

Keywords: Environmental Disasters, Multicriteria, Geoprocessing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Procedimentos básicos para a elaboração dos mapas de suscetibilidade.....	27
Figura 2 – Etapas principais do método AHP.....	31
Figura 3 – Exemplo da etapa de Estruturação Hierárquica.....	32
Figura 4 – Estruturação do problema, conforme exemplo de Batista (2019).....	36
Figura 5 – Mapa de suscetibilidade da Comunidade São José do Jacó.....	40
Figura 6 – Localização da área de estudo.....	42
Figura 7 – Ocupação desordenada no município de Areia (PB).....	43
Figura 8 – Etapas do processo de crescimento urbano em Areia (1701-2005).....	44
Figura 9 – Deslizamento ocorrido em Areia (PB).....	45
Figura 10 – Localização das áreas de risco diagnosticadas pela CPRM.....	46
Figura 11 – Gráficos SPT do talude MM.....	47
Figura 12 – Sobreposição das curvas de compressão edométrica.....	48
Figura 13 – Precipitação da última década no município de Areia (PB).....	49
Figura 14 – Fluxograma da pesquisa.....	51
Figura 15 – Localização da área de estudo.....	53
Figura 16 – Tipos de curvatura da encosta.....	54
Figura 17 – Estrutura hierárquica para aplicação da AHP no município de Areia (PB).....	57
Figura 18 – Exemplo das comparações realizada no método AHP.....	58
Figura 19 – Procedimento esquemático da sobreposição de mapas.....	60
Figura 20 – Mapa de Altitude de Areia (PB).....	62
Figura 21 – Mapa de Declividade de Areia (PB).....	63
Figura 22 – Mapa de curvatura em planta de Areia (PB).....	64
Figura 23 – Mapa de curvatura em perfil de Areia (PB).....	65
Figura 24 – Mapa de Cobertura do solo de Areia (PB).....	66
Figura 25 – Mapa Geológico de Areia (PB).....	67
Figura 26 – Ocupações precárias ao longo de encostas.....	68
Figura 27 – Parcela de solo exposto com presença de bananeiras em terrenos íngremes.....	69
Figura 28 – Uso de lonas plásticas.....	69
Figura 29 – Novas construções sem medidas de prevenção de desastres.....	70
Figura 30 – Pontos de movimentos de massa na área urbana de Areia -PB.....	71
Figura 31 – Mapa de Suscetibilidade a Movimentos de Massa do Município de Areia (PB).....	77
Figura 32 – Movimento de massa próximo a estradas no município de Areia (PB).....	78
Figura 33 – Mapa de suscetibilidade a movimentos de massa na área urbana de Areia-PB.....	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores de consistência aleatória (CA) em função da ordem da matriz.....	35
Tabela 2 – Comparações par a par para o critério “Experiência”.....	36
Tabela 3 – Cálculo do autovetor, para o critério “Experiência”.....	37
Tabela 4 – Resultado da análise de consistência para o critério “Experiência”.....	37
Tabela 5 – Resultado dos pesos de critério e subcritério do exemplo de Batista (2019).....	37
Tabela 6 – Pesos obtidos pelo método AHP para Bacia do Rio Paquequer (RJ).....	38
Tabela 7 – Pesos obtidos pelo método AHP para distrito de Ziyang, China.....	41
Tabela 8 – Classes de declividade conforme Embrapa (1979).....	54
Tabela 9 – Pesos obtidos para os critérios de suscetibilidade e seus subcritérios.....	73

Tabela 10 – Análise de sensibilidade dos indicadores	76
Tabela 11 – Frequência dos movimentos de massa nas classes dos critérios.....	79
Tabela 12 – Pesos atribuídos aos sub-critérios.....	80
Tabela 13 – Ocorrências de movimentos de massa por classes de suscetibilidade.....	84

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classificação de desastres naturais quanto à intensidade	16
Quadro 2 – Classificação dos movimentos de massa, conforme Varnes (1978).....	19
Quadro 3 – Classificação dos movimentos de massa, conforme Augusto Filho (1992).	20
Quadro 4 – Indicadores de suscetibilidade utilizados nos últimos anos.....	22
Quadro 5 – Conceitos básicos para estudo de áreas de risco.....	26
Quadro 6 – A escala fundamental de Saaty (1987)	33
Quadro 7 – Caracterização das unidades geológicas presentes em Areia (PB).....	50
Quadro 8 – Definição das classes de uso e cobertura da terra do município de Areia (PB)	55

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	12
1.1	Considerações Preliminares	12
1.2	Objetivos geral e específicos	13
1.1.1	Objetivos Específicos	13
1.3	Justificativa	14
1.4	Estrutura da dissertação	15
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	Desastres Naturais e Urbanização Brasileira.....	16
2.2	Movimentos gravitacionais de massa e classificações	17
2.3	Causas e condicionantes.....	21
2.4	Conceitos e terminologias das análises de risco	25
2.5	Suscetibilidade a movimentos de massa	27
2.6	Metodologias de avaliação de suscetibilidade	28
2.7	Análise de Processo Hierárquica (AHP).....	30
2.7.1	Decomposição.....	31
2.7.2	Julgamentos	32
2.7.3	Autovetor	33
2.7.4	Análise de consistência	34
2.7.5	Valoração global	35
2.8	Suscetibilidade a movimento de massa com abordagem semiquantitativa.....	38
2.8.1	Exemplo aplicado na Bacia do Rio Paquequer (RJ)	38
2.8.2	Exemplo aplicado em São José do Jacó, Natal (RN)	39
2.8.3	Exemplo aplicado no distrito de Ziyang, China.....	40
3.	ÁREA DE ESTUDO.....	42
3.1	Introdução	42

3.2	Caracterização Geoambiental	46
3.2.1	Aspectos morfológicos e geotécnicos	46
3.2.2	Aspectos climáticos	48
3.2.3	Aspectos geológicos	49
3.3	Caracterização Pedológica	50
4.	METODOLOGIA	51
4.1	Introdução	51
4.2	Seleção da área de estudo	52
4.3	Seleção dos indicadores e elaboração dos mapas temáticos	53
4.3.1	Altitude	53
4.3.2	Declividade	54
4.3.3	Morfologia em planta e em perfil	54
4.3.4	Geologia.....	55
4.3.5	Uso e cobertura do solo	55
4.3.6	Distância para Estradas	56
4.3.7	Distância para Drenagem	56
4.4	Trabalhos de campo	56
4.5	Elaboração da matriz AHP	57
4.5.1	Peso dos critérios (Nível 1).....	57
4.5.2	Pesos dos sub-critérios (Nível 2)	58
4.6	Mapa Preliminar: Zoneamento de Suscetibilidade	59
4.7	Mapa de Suscetibilidade da Área urbana	60
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	62
5.1	Análise geoambiental do município	62
5.2	Pesquisa de campo	68
5.3	Levantamento de Inventário	71
5.4	Matriz de decisão AHP	72

5.5	Mapa preliminar.....	76
5.6	Mapa de suscetibilidade da área urbana.....	79
6.	CONCLUSÃO.....	85
	REFERÊNCIAS	87

1. INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Preliminares

Desastres em encostas urbanas são resultado de um conjunto de fragilidades geomorfométricas, geológicas e geotécnicas, potencializados por ações antrópicas. A análise e identificação dessas regiões, cuja dinâmica natural favorece a instabilização dos maciços de solo, é uma alternativa de subsídio para o planejamento e gestão urbana dos municípios.

Movimentos de massa são processos geodinâmicos causados por variáveis de diferentes categorias como fatores geológicos, 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. Os estudos acerca desses processos impulsionaram os avanços mais relevantes com relação a compreensão do comportamento dos solos (LIRA, 2022).

A análise e mapeamento das áreas de risco de movimentos de massa, conforme a proposta do Ministério das Cidades (BRASIL, 2007), é precedido pelo mapa de suscetibilidade, cujo objetivo é indicar a potencialidade de ocorrência de processos naturais e induzidos em uma dada área. O mapa de suscetibilidade a movimento de massa, citado na literatura internacional como LSM (*Landslide Susceptibility Mapping*), é crucial nas avaliações de encostas, sendo necessário na elaboração de medidas de prevenção e planejamento do uso e ocupação do solo.

Grande parte dos mapeamentos de encostas no Brasil são realizados por metodologias qualitativas, onde as análises e constatações são baseadas na opinião dos profissionais envolvidos por meio de observações obtidas em campo e informações dos moradores da região em análise. Embora possa subsidiar as ações de mitigação de risco, para muitos pesquisadores da temática a abordagem do método gera certa subjetividade sobre o resultado obtido. Dessa forma, se faz necessário o aprimoramento das técnicas tradicionais buscando reduzir o grau de subjetividade agregado (BEZERRA, 2019).

Atualmente, o Sistema de Informação Geográfica (SIG) desempenha um papel fundamental no mapeamento de suscetibilidade de encostas, através do qual múltiplos dados geocientíficos espaciais e não espaciais podem ser visualizados, processados e analisados. Nesse sentido, a incorporação de rotinas de apoio à decisão no ambiente SIG, 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).

A aplicação do Processo de Análise Hierárquica (AHP - *Analytic Hierarchy Process*) baseada em SIG tem sido empregada com sucesso, 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; AUGUSTO FILHO, 2013). Embora existam metodologias mais modernas, o método AHP ainda é necessário em avaliações de suscetibilidade para áreas com falta de inventário detalhado (CHANU, BAKIMCHANDRA; 2022).

De acordo com o Mapa de Prevenção de Desastres do Serviço Geológico do Brasil (CPRM, 2023), o país tem 4.160 mil áreas de risco muito alto e outras 9.498 áreas de risco alto, colocando a vida de 3.983 milhões de pessoas em perigo, especialmente em locais assentados sobre terrenos íngremes, morros e regiões serranas, naturalmente sujeitas a processos de instabilização de encostas.

Com o aumento da ocorrência dos desastres nos últimos tempos, é fundamental o estudo e aplicação dessas metodologias em regiões propensas a movimentos de massa, considerando a hipótese de uma avaliação mais confiável e, do ponto de vista geotécnico, que gera mais uma alternativa de suporte ao planejamento de uso e ocupação do solo e gerenciamento de risco.

Diante da atual situação do município de Areia, localizado na região serrana do estado da Paraíba, com histórico de ocupação desordenada, topografia acidentada e relatos de movimentos de massa, o objetivo do presente estudo foi mapear as áreas propensas a movimentos de massa no município, distinguindo as classes de suscetibilidade, a partir de análises multicritérios espaciais em software SIG. Os resultados podem subsidiar a tomada de decisão dos gestores municipais responsáveis pela gestão urbanística, pois permitem uma atuação mais ampla e uma visão mais integrada dos aspectos de uso e ocupação do solo.

1.2 Objetivos geral e específicos

Os estudos realizados nesta pesquisa têm como objetivo mapear as áreas propensas a movimentos de massa no município de Areia-PB, identificando os graus de suscetibilidade dos locais.

1.1.1 Objetivos Específicos

- Analisar a geomorfologia da área de estudo, a partir de SIG;
- Avaliar pontos de deslizamentos, com base nos indicadores de suscetibilidade;
- Validar uma matriz AHP para uso na análise da suscetibilidade da área de estudo;
- Comparar o resultado do mapa final com as áreas identificadas pela CPRM (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais).

1.3 Justificativa

Os métodos semiquantitativos têm sido aplicados com sucesso na avaliação de suscetibilidade de encostas, em função do uso de parâmetros geocientíficos associado a aplicação do conhecimento e experiência de especialistas. Mesmo em áreas com pouca disponibilidade de dados, a flexibilidade do enfoque qualitativo e a consistência do enfoque quantitativo tem se configurado como uma alternativa eficaz para determinação de áreas propensa a eventos extremos (FARIA, AUGUSTO FILHO; 2013).

Distante 122 km da capital João Pessoa, o município paraibano de Areia, embora possua um histórico de movimentos de massa, não possui um banco de dados que mapeie e documente esses eventos. Mesmo com a fragilidade propiciada pelas características ambientais e de uso e ocupação do sítio urbano, o Plano Diretor do município não traz soluções e mediações de urgência e longo prazo específicas para a paisagem geomorfológica-urbana de risco. Relatórios sobre as áreas críticas do município são escassos, o que dificulta as ações de mitigação e prevenção de desastres.

Ao longo da trajetória de ocupação, grande parte das construções foram feitas em encostas, sem nenhum planejamento ou gerenciamento de uso do solo, representando um perigo para a população e infraestrutura da cidade. Em 2017, Areia (PB) foi incluída pelo INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) como zona de perigo de alagamentos, deslizamentos de encostas e transbordamento de rios devido à ação das chuvas (LIRA, 2022).

Para esses locais com dados disponíveis limitados, os mapas resultantes devem ser vistos com cautela, ademais, “sem validação, os modelos de suscetibilidade a movimentos de massa não terão significância técnica” (ACHOUR, PURGHASEMI, 2020). Portanto, os resultados desta pesquisa serão analisados e comparados com registros históricos e estudos anteriores sobre o município para a avaliação da confiabilidade do modelo.

A elaboração do Mapa de Suscetibilidade a Movimentos de Massa no município de Areia (PB) deve-se a uma alta demanda de reconhecer a distribuição espacial das áreas propensas ao desencadeamento desse fenômeno. Assim, a pesquisa é justificada pela necessidade de mapear uma área com dados restritos e uma considerável fragilidade geomorfométrica, segundo uma metodologia preexistente, significativamente realista, nos estudos de movimentos de massa, cujos resultados são decisivos para eficácia de políticas de intervenção voltada ao gerenciamento de ocupação do solo.

1.4 Estrutura da dissertação

Esta pesquisa foi estruturada em 6 capítulos. O capítulo 1 é introdutório, onde é especificado objetivos e justificativa. O capítulo 2 apresenta os aspectos conceituais, com ênfase nos movimentos de massa. Também são apresentados os métodos de mapeamento de encostas urbanas e os métodos de apoio a decisão multicritério, com destaque ao processo de análise hierárquica (AHP). O capítulo 3 apresenta uma breve caracterização da área de estudo. O capítulo 4 apresenta a metodologia aplicada no desenvolvimento da pesquisa. No capítulo 5 é apresentada a análise dos resultados obtidos com a incorporação do AHP no mapeamento de suscetibilidade. Também foram mostrados nesse capítulo os resultados da aplicação do AHP nas áreas selecionadas utilizando opinião dos especialistas. O capítulo 6 apresenta as conclusões desse trabalho e as sugestões de temas para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão da literatura está dividida em 6 partes: a primeira, apresenta a importância do estudo de desastres ambientais no âmbito nacional, a segunda e terceira parte apresenta os processos de movimentos de massa, abordando conceitos, classificações e condicionantes. A quarta parte trata sobre os conceitos das análises e áreas de risco. O quinto e sexto tópico abordam sobre os conceitos de suscetibilidade a movimentos de massa e os principais métodos de análise de encostas, com foco no Processo de Análise Hierárquico (AHP).

2.1 Desastres Naturais e Urbanização Brasileira

A paisagem natural passa por inúmeras transformações ao longo do tempo, em função de processos geológicos, hidrológicos, climatológicos e meteorológicos. Quando tais processos causam danos às atividades econômicas, ambientais ou humanas, ocorre um desastre natural, cujos impactos são acentuados pela falta de planejamento urbano e de uma implantação efetiva de políticas públicas para sua prevenção (SAITO, SORIANO, LONDE, 2016).

O planejamento da resposta e da recuperação da área atingida por um desastre depende da intensidade do evento. As ações e os recursos necessários para socorro às vítimas dependem da quantificação dos danos e prejuízos provocados. O Quadro 1 mostra uma classificação dos desastres em relação à intensidade.

Quadro 1 – Classificação de desastres naturais quanto à intensidade

Nível	Intensidade	Situação
I	Pequena intensidade, também chamados de acidentes, onde os impactos causados são pouco importantes e os prejuízos pouco vultosos (Prejuízo de até 5% PIB municipal)	Facilmente superável com os recursos do município.
II	Média intensidade, onde os impactos são de alguma importância e os prejuízos são significativos, embora não sejam vultosos (Prejuízos entre 5% e 10% PIB municipal)	Superável pelo município, desde que envolva uma mobilização e administração especial.
III	Grande intensidade, com danos importantes e prejuízos vultosos (Prejuízos entre 10% e 30% PIB municipal)	A situação de normalidade pode ser restabelecida com recursos locais, desde que complementados com recursos estaduais e federais. <i>(Situação de Emergência – SE)</i>
IV	Muito grande intensidade, com impactos muito significativos e prejuízos muito vultosos (Prejuízos maiores que 30% PIB municipal)	Não é superável pelo município, sem ajuda externa. Eventualmente necessita de ajuda internacional <i>(Estado de Calamidade Pública – ECP)</i>

Fonte: Kobiyama *et al*, (2006 *apud* Tominaga, 2009a).

A âmbito nacional, de acordo a Confederação Nacional de Municípios – CNM (2022), de janeiro de 2020 a abril de 2022, mais de 132,2 milhões de pessoas foram afetadas por desastres naturais. O prejuízo econômico estimado ultrapassa os R\$ 186,9 bilhões, dos quais, 90,5% são estimados no setor privado, correspondendo a R\$ 169,2 bilhões, já o setor público contabilizou mais de R\$ 17,7 bilhões, correspondendo a 9,5% do total.

Tais prejuízos são consequência do processo de urbanização brasileiro que, ao longo do tempo, levou a população de baixa renda a ocupar áreas naturalmente frágeis de forma precária. Aterros instáveis, taludes de corte em encostas íngremes, palafitas, ausência de redes de abastecimento de água, drenagem e coleta de esgoto são ações que aumentam a suscetibilidade e vulnerabilidade das áreas ocupadas, fazendo surgir setores de alto risco (BRASIL, 2007).

Desde a primeira Constituição do Império do Brasil, em 1824, as legislações incluíam temas de proteção aos cidadãos, como socorro público, calamidade pública, efeitos da seca, desastres e perigos iminentes. Entretanto, até a década de 1940, não havia um órgão voltado ao atendimento da população em situação de desastre, visto que as leis tratavam apenas das respostas às ocorrências de desastres. Atualmente, a Lei 12.608/2012 é a responsável pelas diretrizes da estruturação da Proteção e Defesa Civil no país onde, pela primeira vez, trouxe os temas de prevenção e mitigação do risco de desastres (UFSC, 2013).

Mesmo com as orientações para com as ações de risco bem definidas, os eventos de movimentos de terra causam grande preocupação à sociedade civil e às autoridades governamentais em todo o mundo, especialmente no Brasil. Devido às características do meio físico, clima tropical e à alta pluviosidade, o País apresenta um conjunto de fatores que, somados ao cenário de uso e ocupação da terra desordenado, favorecem o desencadeamento de fenômenos de movimentos de massa (IBGE, 2019).

Dessa forma, se faz imprescindível entender os conceitos relacionados aos desastres naturais, com foco das definições associados ao tema, tipos de análise e metodologias de mapeamento, a fim de se criar alternativas para as ações de prevenção e/ou mitigação da probabilidade desses eventos extremos.

2.2 Movimentos gravitacionais de massa e classificações

Existem diversas sugestões para conceituar o termo “movimentos de massa”. Conforme a proposta de Cruden (1991) movimentos de massa são “movimento descendente de uma massa de rocha, terra ou detritos” em uma encosta. Importante ressaltar que, mesmo antiga, essa definição ainda é bastante empregada e aceita no meio técnico. Corroborando com o autor, Achour e Purghasemi (2020) afirmam que esses movimentos ocorrem sob a influência direta

da gravidade, provocando uma descida rápida de uma porção considerável de detritos, solo ou rocha na parte inferior das encostas, além de serem muito frequentes em regiões montanhosas.



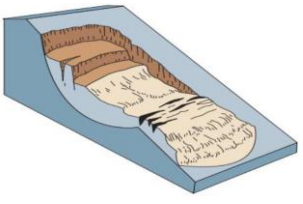
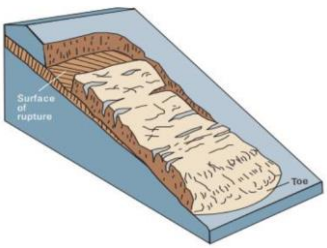
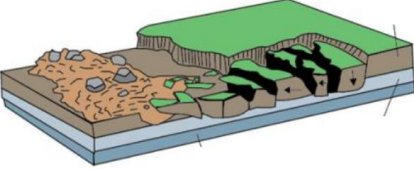
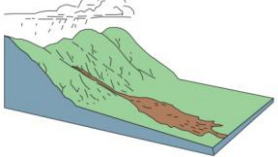
As definições variam conforme a experiência e conhecimento dos autores. A própria terminologia movimentos de massa (*mass movements*) passou a ser utilizada após publicação de Varnes (1978), cuja proposta buscou melhorias na comunicação técnica. O autor, embora acredite não haver único termo simples que abranja a gama de processos discutidos, sugeriu que o termo “deslizamentos” (*landslides*), antes utilizado de forma mais abrangente, não deve ser usado para se referir a movimentos que não incluem nenhum deslizamento verdadeiro.

Assim como as definições, existem várias classificações para os movimentos de massa, “em virtude da complexidade dos processos envolvidos e da multiplicidade de ambientes de ocorrência, assim como dos diferentes enfoques dados” (BEZERRA, 2019).

Entre as classificações para os movimentos de massa, pode-se citar as apresentadas por Skempton & Hutchinson (1969), Varnes (1978), Bromhead (1986), Hutchinson (1988), Sassa (1985a, 1985b e 1989), Cruden & Varnes (1996), entre outros. Cada uma dessas classificações leva em consideração fatores distintos, como dinâmica e geometria do movimento, tipo de material movimentado, causas e agentes causadores, aspectos morfológicos, entre outros.

A classificação sugerida por Varnes (1978) se tornou uma referência nos estudos de movimento de massa. Embora a classificação de 1958, elaborada pelo mesmo autor, tenha sido bem recebida pela comunidade, algumas deficiências se tornaram aparentes, especialmente, em função de novos dados sobre processos de taludes publicados. Os principais critérios utilizados na nova classificação, são o tipo de movimento e o tipo de material, secundariamente. No Quadro 2, é mostrada uma versão ilustrada da proposta do autor.

Quadro 2 – Classificação dos movimentos de massa, conforme Varnes (1978)

Tipo de movimento		Definição Geral
<p>Queda (<i>fall</i>)</p> 		<p>Desprendimento de uma massa de qualquer tamanho de uma encosta íngreme, descendo sobretudo através do ar, por queda livre, ou também rolando. Velocidade de queda entre alta e muito alta.</p>
<p>Tombamento (<i>topple</i>)</p> 		<p>Rotação de uma unidade (material) em torno de um ponto, sobre a ação da gravidade e de forças exercidas por unidades adjacentes. Por vezes são provocados pelo peso do material acima da encosta sobre a massa deslocada. Outras vezes ocorre devido à presença de água ou gelo em fraturas existentes.</p>
Escorregamento (<i>slide</i>)	<p>Rotacional</p> 	<p>Ocorrem ao longo de uma superfície de ruptura com curvatura côncava (forma de colher) e o movimento é mais ou menos rotacional em torno de um eixo que é paralelo à encosta. Ocorre normalmente em materiais homogêneos.</p>
	<p>Translacional</p> 	<p>A massa movimenta-se para fora ou para fora e para baixo da encosta ao longo de uma superfície mais ou menos planar ou com poucas ondulações. Esse tipo de movimento pode progredir até distâncias consideráveis se a superfície de ruptura for suficientemente inclinada. Ocorrem comumente ao longo de descontinuidades geológicas ou no contato entre o solo e a rocha.</p>
<p>Espalhamento Lateral (<i>lateral spread</i>)</p> 		<p>Ocorre em encostas muito suaves ou planas, sobretudo em locais onde uma camada resistente de solo ou rocha movimenta-se sobre uma camada pouco resistente. Essas rupturas normalmente são acompanhadas de subsidência das unidades compostas por material mais fraco. Taxa de movimentação extremamente baixa.</p>
<p>Fluxo (<i>flow</i>)</p> 		<p>Movimento espacialmente contínuo, no qual as superfícies de cisalhamento são usualmente não visíveis/preservadas, ou possuem curta duração. A distribuição de velocidade na massa deslocada parece com a de um líquido viscoso.</p>
<p>Complexo</p>		<p>Combinação de um ou mais dos tipos principais de movimento acima descritos.</p>

Fonte: Bezerra (2019)

No contexto nacional, Tominaga (2009b) destacam as classificações de Freire (1965), de Guidicini & Nieble (1984) e de Augusto Filho (1992), das quais esta última foi baseado em estudos realizados na Serra do Mar, em que reúne as principais características dos movimentos gravitacionais de massa. É uma classificação simples e de fácil compreensão, o qual leva em conta, principalmente, a composição do material e a velocidade de deslocamento. O Quadro 3 traz um resumo da proposta de classificação do autor.

Quadro 3 – Classificação dos movimentos de massa, conforme Augusto Filho (1992).

PROCESSOS	DINÂMICA/GEOMETRIA/MATERIAL
Rastejos (<i>creep</i>)	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Vários planos de deslocamento (internos) ✓ Velocidades muito baixas (cm/ano) a baixas e decrescentes com a profundidade ✓ Movimentos constantes, sazonais ou intermitentes ✓ Solo, depósitos, rocha alterada/fraturada ✓ Geometria indefinida
Escorregamentos (<i>slides</i>)	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Poucos planos de deslocamentos (externos) ✓ Velocidades médias (m/h) a altas (m/s) ✓ Pequenos a grandes volumes de material ✓ Geometria e materiais variáveis: PLANARES – solos pouco espessos, solos e rochas com um plano de fraqueza CIRCULARES – solos espessos homogêneos e rochas muito fraturadas EM CUNHA – solos e rochas com dois planos de fraqueza
Quedas (<i>falls</i>)	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Sem planos de deslocamento ✓ Movimentos tipo queda livre ou em plano inclinado ✓ Velocidades muito altas (vários m/s) ✓ Material rochoso ✓ Pequenos a médios volumes ✓ Geometria variável: lascas placas, blocos, etc. ROLAMENTO DE MATAÇÃO, TOMBAMENTO
Corridas (<i>flows</i>)	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Muitas superfícies de deslocamento ✓ Movimento semelhante ao de um líquido viscoso ✓ Desenvolvimento ao longo das drenagens ✓ Velocidades médias a altas ✓ Mobilização de solo, rocha, detritos e água ✓ Grandes volumes de material ✓ Extenso raio de alcance, mesmo em áreas planas

Fonte: Faria (2011)

Uma das classificações mais recentes e amplamente aceita são de Hungr, Leroueil e Picarelli (2013). A nova proposta tem como base a versão de Varnes (1978), considerando 32 tipos de movimentos de massa, cada um dos quais é apoiado por uma definição formal. A intenção dos autores não era propor algo totalmente novo, apenas revisar e atualizar os vários aspectos da classificação de 1978.

Importante ressaltar que “tanto o tipo de movimento quanto os materiais podem variar de lugar para lugar ou de tempos em tempos, e gradação quase contínua pode existir em ambos, portanto, uma classificação rígida não é prática nem desejável” (VARNES, 1978).

2.3 Causas e condicionantes

Conforme Gerscovich (2016) “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. Alguns fatores influenciam mais diretamente do que outros e conhecê-los é de grande importância.

Os condicionantes antrópicos são muito comuns em áreas de assentamentos precários, podendo citar a remoção da cobertura vegetal, lançamento e concentração de águas pluviais e/ou servidas, vazamento na rede de água e esgoto, presença de fossas etc. Em geral, são ações que obstruem a drenagem natural e favorecem os processos erosivos (BRASIL, 2007).

Já os condicionantes naturais estão relacionados com agentes predisponentes e agentes efetivos. Ambos estão atrelados a fatores impostos pela dinâmica da natureza, com a diferença de que o primeiro são características intrínsecas das encostas, podendo citar condições geológicas, litológicas, estrutura, geomorfologia etc. Já o segundo agente são os elementos deflagradores como a chuva, variação da temperatura, terremotos etc (BEZERRA, 2019). “A contribuição de fatores deflagradores, como água ou gelo, se dá pela redução da resistência dos materiais de vertente e/ou pela indução do comportamento plástico e fluido dos solos” (TOMINAGA, 2009b).

Definir um conjunto de indicadores é uma das etapas mais importantes nas pesquisas de ocorrência de movimentos de massa (BAHRAMI, HASSANI, MAGHSOUDI, 2020). Em geral, eles são coletados com base na sua relevância e disponibilidade de dados no local de estudo (PRADHAN, KIM, 2016). O Quadro 4 destaca alguns indicadores empregados em estudos de suscetibilidade a movimentos de massa nos últimos anos.

Quadro 4 – Indicadores de suscetibilidade utilizados nos últimos anos

AUTORES	INDICADORES
Meirelles, Dourado, Costa (2018)	Declividade, Uso e Cobertura do solo, Forma do Terreno, Prox. a Estradas, Prox. a Drenagens, Geologia, Pedologia, Form. Superficial, Morf. Relevo, Orientação
Liu, Duan (2018)	Prox. a estradas, Elevação, Prox. a rios, Litologia, Distância a falhas, Índice de umidade topográfica (<i>TWI</i>), Inclinação, Índice de vegetação de diferença normalizada (<i>NDVI</i>), Curvatura em planta, Índice de potência do fluxo (<i>SPI</i>), Orientação, Índice de transporte de sedimentos (<i>STI</i>), Curvatura em perfil
Mokarram, Zarei (2018)	Litologia, Precipitação, Uso e Cobertura do solo, Declividade, Prox. a Falhas, Prox. a Drenagens, Prox. a Estradas, Orientação, Elevação
Pokhrel, Bhandari (2019)	Declividade, Orientação, Curvatura em planta e perfil, Elevação, Uso e Cobertura do solo, Geologia, Prox. a Drenagens, Prox. a Estradas
Achour, Pourghasemi (2020)	Elevação, Declividade, Orientação, Curvatura em planta, Curvatura em perfil, <i>SPI</i> , <i>TWI</i> , Litologia, <i>NDVI</i>
Biçer, Ercanoglu (2020)	Declividade, Litologia, Orientação, Elevação, Prox. A Drenagem, Uso e Cobertura do solo, Curvatura, Prox. a falhas, <i>NDVI</i>
Bahrami, Hassani, Maghsoudi (2021)	Prox. a falhas, Prox. a Drenagem, Prox. a Estradas, Declividade, Precipitação, Uso e Cobertura do solo, Litologia
Zhang <i>et al.</i> (2022)	Litologia, Uso e Cobertura do solo, Declividade, Temperatura média anual, Precipitação média anual, Aridez, Índice de umidade (<i>IM</i>), População, Intensidade da atividade humana da superfície terrestre (<i>HAILS</i>), <i>NDVI</i> , Distância do eixo anticlinal, Distância do eixo sinclinal, Prox. a Estradas, Prox. a Drenagem, Elevação, Curvatura em perfil, Orientação, Curvatura em planta, <i>TWI</i> , Amplitude de Alívio

A partir do Quadro 4, nota-se que os indicadores podem ser agrupados em indicadores topográficos, geológicos e hidrológicos, indicando a potencialidade natural a movimentos de massa, além da ação humana. Importante ressaltar, que quanto maior a quantidade de fatores considerados no estudo, maior a confiabilidade dos resultados. Os próximos tópicos, apresentam uma breve explicação das formas de atuação de alguns desses elementos na

ocorrência dos movimentos de massa, visto que esta discussão é etapa fundamental para a compreensão da temática relacionada à risco.

a) Altitude

É a altura do relevo em relação ao nível do mar (FLORENZANO, 2008). A variação de altitude pode estar relacionada a diferentes configurações ambientais, como tipos de vegetação e precipitação, assim como influencia parâmetros biofísicos e atividades antrópicas que, por sua vez, podem gerar falhas nos taludes e afetar sua estabilidade (PRADHAN e KIM, 2016).

b) Declividade

O fator declividade distingue áreas planas de relevos mais íngremes por meio da tangente do ângulo de inclinação da superfície do terreno em relação ao plano horizontal. O ângulo de inclinação é normalmente considerado um dos fatores influentes para a análise de movimentos de massa porque controla as forças de cisalhamento que atuam nas encostas (DOU *et al*, 2015).

Para Kamp *et al* (2008) 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.

c) Morfologia em planta e em perfil

A morfologia das encostas em planta expressa o formato da vertente quando observada em projeção horizontal e se refere ao caráter divergente/convergente dos fluxos de matéria sobre o terreno. Já a morfologia em perfil, é o formato da vertente quando observada em perfil, referindo-se à forma convexo/côncavo do terreno (FLORENZANO, 2008).

O tipo de curvatura das encostas influencia o teor de umidade do solo, mantém o solo saturado e, conseqüentemente, aumenta a suscetibilidade das encostas à erosão e deslizamentos de terra (SAADATKHAH, KASSIM, LEE, 214).

As classes de curvaturas horizontais (morfologia em planta) e verticais (morfologia em perfil) podem ser combinadas para fornecer indicação da forma do terreno (VALERIANO, 2008). Atua como um parâmetro de concentração (côncava/convergente) ou dispersão (convexa/divergente) de fluxo superficial e tem uma forte influência na estabilidade do talude em terrenos íngremes (PRADHAN e KIM, 2016).

Segundo Valeriano (2008), em função da forma do relevo (côncavo-convexo-plano, e suas combinações) determinadas áreas podem apresentar grande concentração e acúmulo de escoamento. Assim, na medida em que ocorre o aumento do fluxo de água, potencializa-se o

transporte de material, removendo e deslocando partículas superficiais do solo para canais de drenagem a jusante, propiciando a geração de movimentos de massa.

d) Geologia

A geologia e a litologia são parâmetros de grande importância no mapeamento de suscetibilidade a movimentos de massa. A litologia refere-se às características dos materiais, dentre elas, estrutura, composição e textura, que atuam de forma a influenciar no comportamento físico e químico das rochas e do solo (VARNES, 1984).

As variações das unidades litológicas levam a uma diferença na resistência e permeabilidade dos solos e, conseqüentemente, têm diversos graus de suscetibilidades. Muitos pesquisadores da área utilizaram a geologia como um parâmetro de entrada para avaliar a suscetibilidade dos movimentos (MEZUGHU *et al*, 2012).

e) Uso e cobertura do solo

A cobertura e uso do solo é o principal fator que condiciona diretamente a ocorrência dos movimentos de massa, principalmente em áreas urbanas, uma vez que estão relacionados à interferência antrópica nas encostas dos morros (BEZERRA, 2019).

A intensidade e suscetibilidade dos movimentos de massa podem ser influenciadas em função do uso e tipo de cobertura do solo. O efeito da vegetação 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).

f) Distância para Estradas

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 na redução da força de resistência ao cisalhamento do solo (FAN *et al*, 2017). Essas atividades alteram o equilíbrio natural dos solos, que por sua vez leva à degradação física com foco na erosão hídrica e deslizamentos de terra (ACHOUR E PURGHASEMI, 2020).

g) 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, 2019).

A relação de proximidade dos cursos d'água estão diretamente associados a forma da encosta, a umidade e a formação de sulcos e ravinas. Por serem geralmente no formato côncavo,

acabam sendo zonas de convergência de fluxos d'água, saturação do solo e intensificação dos processos erosivos, que pode desencadear os movimentos de massa (MEIRELLES *et al*, 2018).

2.4 Conceitos e terminologias das análises de risco

“Alguns termos são recorrentes nas definições e classificações relacionadas a desastres: sociedade, efeitos, impactos, danos, prejuízos. Eles, por sua vez, conduzem a temas mais complexos, como risco, perigo, vulnerabilidade e resiliência” (SAITO, SORIANO, LONDE, 2015).

De forma análoga, Shano, Raghuvanshi e Meten (2020) afirmam que no estudo de movimentos de massa existem três componentes básicos, estes são perigo, risco e suscetibilidade. A definição unificada dessas nomenclaturas é uma forma de facilitar a comparação dos estudos realizados em áreas adjacentes e assegurar que passos fundamentais de avaliação sejam propriamente considerados e aplicados, visto que esses conceitos eram empregados com significados distintos, desde o início dos estudos de perigos naturais (HENRIQUE, 2014).

Em um contexto geral, o termo risco (*risk*) expressa a possibilidade de perdas materiais ou sociais, através da ocorrência de um acidente, todavia, o termo possui significados diferentes para várias pessoas e profissões (VARANDA, 2006). Assim, é necessário sempre definir e especificar os termos apropriados para cada finalidade de estudo.

Augusto Filho *et. al.* (1990) propôs um conceito de risco baseada na relação da possibilidade de ocorrência do evento destrutivo e as consequências potenciais do evento, conforme equação:

$$R = P \times C \quad \text{(Equação 1)}$$

R = risco;

P = probabilidade (ou frequência) de ocorrência do fenômeno e;

C = consequências (perda sociais e/ou econômicas).

Da mesma forma, Cerri (1993) afirma que a identificação dos riscos geológicos de movimentos de massa envolve a indicação das áreas suscetíveis a ocorrências destes processos (perigo) e as consequências sociais e econômicas potenciais (possíveis danos).

Dada a necessidade de se homogeneizar o entendimento das equipes técnicas na esfera nacional, o Ministério das Cidades adotou essa proposta de conceito de risco e mais alguns termos correlatos para sua metodologia de mapeamento em encostas e margens de rios (BRASIL, 2007). O Quadro 5 mostra a proposta de definição.

Quadro 5 – Conceitos básicos para estudo de áreas de risco

EVENTO
Fenômeno com características, dimensões e localização geográfica registrada no tempo, sem causar danos econômicos e/ou sociais.
PERIGO (HAZARD)
Condição ou fenômeno com potencial para causar uma consequência desagradável.
VULNERABILIDADE
Grau de perda para um dado elemento, grupo ou comunidade dentro de uma determinada área passível de ser afetada por um fenômeno ou processo.
SUSCETIBILIDADE
Indica a potencialidade de ocorrência de processos naturais e induzidos em uma dada área, expressando-se segundo classes de probabilidade de ocorrência.
RISCO
Relação entre a possibilidade de ocorrência de um dado processo ou fenômeno, e a magnitude de danos ou consequências sociais e/ou econômicas sobre um dado elemento, grupo ou comunidade. Quanto maior a vulnerabilidade, maior o risco.
ÁREA DE RISCO
Área passível de ser atingida por fenômenos ou processos naturais e/ou induzidos que causem efeito adverso. As pessoas que habitam essas áreas estão sujeitas a danos à integridade física, perdas materiais e patrimoniais. Normalmente, no contexto das cidades brasileiras, essas áreas correspondem a núcleos habitacionais de baixa renda (assentamentos precários).

Fonte: BRASIL, 2007.

Cada conceito básico citado no Quadro 5, é estudado sob finalidade e parâmetros diferentes, todavia, a relação e interação entre os termos é o que define os elementos expostos. A delimitação das zonas de suscetibilidade e de ocupação (área urbanizada), define os objetos de análises específicas em relação a perigo e risco dos eventos de desastres (IPT, 2014).

O conceito de risco e sua aplicabilidade são fundamentais para definição dos parâmetros e condicionantes da análise e posterior entendimento dos produtos elaborados. Se faz necessário diferenciar as cartografias de perigo e risco, pois a aplicação do tipo de mapa depende da disponibilidade de informações e do objetivo do produto final (FARIA, 2011).

Kamp *et al.* (2008) afirma que uma das etapas a serem realizadas na avaliação e gestão de danos por movimentos de massa, além do mapa de risco, requer a produção de um mapa de suscetibilidade, que inclui a distribuição espacial dos parâmetros de controle do evento responsáveis pelas falhas de talude. Achour e Pourghasemi (2020) acreditam que a modelagem da suscetibilidade a movimentos de encostas é essencial para o planejamento e gerenciamento do uso e ocupação do solo, além de subsidiar ações de prevenção.

2.5 Suscetibilidade a movimentos de massa

A distinção de zonas propensas a movimentos é uma necessidade tanto para os governos locais quanto para os institutos de pesquisa. O mapeamento de suscetibilidade a movimentos de terra é um dos métodos de avaliação mais utilizados, pois determina a distribuição espacial de zonas com diferentes probabilidades de ocorrência de movimentos de massa em uma determinada área (ZHANG *et al.*, 2022).

No contexto nacional, um dos objetivos da Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (PNPDEC), (Lei Federal 12.608/2012), é a identificação e avaliação das ameaças, suscetibilidades e vulnerabilidades a desastres, de modo a evitar ou reduzir sua ocorrência. Para tanto, a Lei inclui o mapeamento de áreas suscetíveis a eventos extremos entre as ferramentas essenciais à prevenção de desastres.

O conceito e aplicação da suscetibilidade está associada com a propensão dos terrenos a processos e os fatores predisponentes. Conforme Cerri e Amaral (1998), para cada processo geológico, devem ser identificadas as principais condições predisponentes, as intervenções antrópicas desencadeadoras e as feições de campo indicativas. A análise de suscetibilidade procura contribuir na formulação de respostas à pergunta “onde pode ocorrer?” (IPT, 2014).

De uma forma geral, a concepção e os procedimentos básicos para o mapeamento de áreas suscetíveis a movimentos de massa foram sintetizados na Figura 1.

Figura 1 – Procedimentos básicos para a elaboração dos mapas de suscetibilidade.



Fonte: Adaptado de IPT, 2014.

Diversos aspectos afetam a precisão da suscetibilidade a movimentos de massa e dificultam a captura precisa da localização espacial dos deslizamentos. Tais aspectos podem ser divididos em dois tipos: a entrada de dados de suscetibilidade antes da modelagem, como a determinação dos fatores condicionantes, a qualidade e a quantidade das amostras no inventário de ocorrências; a outra é a escolha da metodologia para a modelagem, como diferentes algoritmos, funções de kernel e seus parâmetros (MARTINI *et al.*, 2006).

Para os trabalhos de mapeamento de suscetibilidade, ainda que uma área tenha sido modificada em relação a suas características, seja pela urbanização ou por outros tipos de intervenções e, dessa forma, passe a favorecer ou desfavorecer o desenvolvimento de processos do meio físico, pressupõe-se que os fatores predisponentes podem ainda estar presentes e, portanto, devem ser considerados para fins de planejamento e gestão territorial (IPT, 2014).

2.6 Metodologias de avaliação de suscetibilidade

Dada a grande diversidade de abordagens dos métodos de análise e mapeamento de risco e suscetibilidade a movimentos de massa, são destacadas neste item, apenas algumas propostas que têm sido adotada como principais referências.

Não existe uma única metodologia para a avaliação de áreas suscetíveis a processos geológico/geotécnico. Estudos apontam três grupos principais: os quantitativos, qualitativos e semiquantitativos. O que diferencia os métodos é a natureza dos dados utilizados para definir as classes de suscetibilidade de um local (BAHRAMI, HASSANI, MAGHSOUDI, 2020). Ressalta-se que cada metodologia possui suas especificidades, mas todas possuem como base o uso de experiências anteriores de ocorrências para realizar a previsão e a prevenção a novas ocorrências de movimentos de massa (RIFFEL, 2017).

Para os procedimentos qualitativos são usados dados baseados no conhecimento e julgamento de um ou mais especialistas que está realizando a avaliação. Os dados considerados são usualmente derivados de observações de campo e de interpretação de fotos aéreas. Apesar das desvantagens em relação à subjetividade apontada por vários autores, esse método tem sido muito utilizado, sendo aplicado principalmente em áreas que não dispõem de dados suficientes para outros tipos de análises (TOMINAGA, 2007). Nesse método, o grau de risco é estabelecido por níveis literais, ou seja, por termos linguísticos (baixo, médio, alto, muito alto).

Já nos métodos quantitativos são usados dados estatísticos, em que originam, como resultado, uma estimativa numérica, isto é, a probabilidade de ocorrência de movimentos de massa e a distribuição probabilística das consequências em uma determinada área (BEZERRA, 2019). Os métodos quantitativos são fundamentados em expressões matemáticas que

relacionam os movimentos de massa com os fatores desencadeantes, diferentes combinações de fatores podem controlar diferentes tipos de movimentos de massa dentro da mesma área (COROMINAS *et al.*, 2014).

Métodos quantitativos, necessitam de uma grande quantidade de dados detalhados das encostas, obtidos em ensaios de laboratórios e medições em campo, o que limita sua aplicação para estudos localizados em função do alto custo de obtenção dos dados (FARIA, 2011). Além disso, o enfoque quantitativo não pode ser aplicado onde dados sobre a frequência dos movimentos de massa não existam ou tenham um grau de incerteza não confiável.

Por fim, os métodos semiquantitativos combinam as abordagens das análises qualitativas e quantitativas. Avaliações desse tipo consideram que um número de fatores influencia na estabilidade, e, para cada um desses fatores, atribui pontuações que são usadas para avaliar o quanto o fator é favorável ou desfavorável à ocorrência da instabilização e à ocorrência de perdas ou prejuízos (ABELLA; VAN WESTEN, 2007).

Atualmente, tem sido bastante utilizado o uso da metodologia semiquantitativa. Em seus estudos, Zhang *et al.*, (2022) constataram que, quando comparado com o método quantitativo convencional, a avaliação quantitativa integrada com base nos resultados da análise qualitativa mostrou maior confiabilidade.

Vários estudos têm sido feitos sobre a modelagem de suscetibilidade usando diferentes abordagens, como razão de frequência (*FR*) (Saadatkah e Kassim, 2013; Park *et al.*, 2012), pesos de evidência (*WOE*) (Liu e Duan, 2018; Wang *et al.*, 2019), regressão logística (*LR*) (Park *et al.*, 2012), redes neurais artificiais (*ANN*) (Pradhan e Sameen, 2019; Park *et al.*, 2012), métodos *fuzzy* (Mokarram e Zarei, 2018; Bahrami, Hassani e Maghsoudi, 2020), floresta aleatória (*RF*) (Dou *et al.*, 2019; Achour e Pourghasemi, 2020), máquinas de vetores de suporte (*SVM*) (Pourghasemi *et al.*, 2013b; Achour e Pourghasemi, 2020), árvore de regressão reforçada (*BRT*) (Park e Kim, 2019; Achour e Purghasemi, 2020) e processo de análise hierárquica (*AHP*) (Park *et al.*, 2012; Saadatkah e Kassim, 2013; Fan *et al.*, 2017; Mokarram e Zarei, 2018; Bahrami, Hassani e Maghsoudi, 2020).

O método Processo de Análise Hierárquica (*AHP*) é um dos melhores exemplos dos métodos semiquantitativos usados no mapeamento de suscetibilidade a movimentos de massa, pela possibilidade de converter os julgamentos de avaliadores em valores numéricos, que podem ser confrontados entre si de modo racional e consistente (ABAY, BARBIERI E WOLDEAREGAY, 2019).

A aplicação da metodologia AHP permite que os estudos de suscetibilidade e risco focados ao mapeamento de encostas se tornem menos subjetivos e mais sistemáticos, seja na análise dos indicadores ou na hierarquização das zonas críticas. A análise de sensibilidade empregada no método, admite uma maior percepção da eficácia dos julgamentos qualitativos e, portanto, um maior nível de confiança na tomada de decisão (BEZERRA, 2019).

2.7 Análise de Processo Hierárquica (AHP)

A ideia geral da teoria da análise hierárquica introduzida por Saaty é a redução do estudo de sistemas a uma sequência de comparações aos pares. Reflete o método natural de funcionamento da mente humana, isto é, diante de um grande número de elementos (controláveis ou não), a mente os agrega em grupos segundo propriedades comuns (GOMES, 2009).

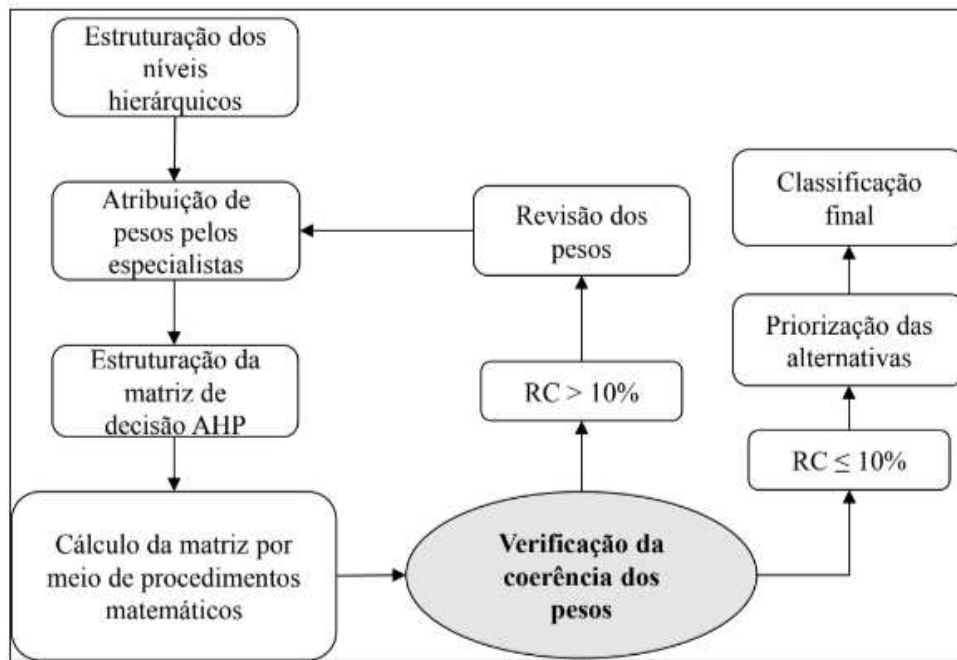
O Processo de Análise Hierárquica (AHP) é um método bastante utilizado ao redor do mundo. Entretanto, de acordo com Bezerra (2019), “apenas recentemente pesquisas têm sido desenvolvidas com o objetivo de aplicar o AHP no gerenciamento de riscos geológicos-geotécnicos”. O método apresenta propriedades interessantes para o desenvolvimento de estudos relacionados ao mapeamento de encostas. Faria (2011) destacou as principais características do método:

- Quantidade de julgamentos em análises com muitos critérios e alternativas;
- Possibilidade de tratar dados qualitativos e quantitativos;
- “Ranking” completo das alternativas;
- Soluções muito refinadas;
- Permite a avaliação da coerência dos julgamentos;
- Facilidade para estruturar o problema;
- Nível alto de compressão conceitual;
- Nível alto de compressão referente à forma de trabalho;
- Transparência no processamento das análises e dos resultados e;
- Alta quantidade de aplicações práticas.

Yalcin (2008) cita o uso do AHP como um “método amplamente utilizado na seleção de locais, análise de adequação, planejamento regional e análise de suscetibilidade a deslizamentos de terra”. Ainda que já se utilizem metodologias mais modernas, como *Machine Learning* (ML) e *Deep Learning* (DL), o método AHP ainda é necessário em avaliações de suscetibilidade para áreas com falta de inventário detalhado (CHANU, BAKIMCHANDRA; 2022).

O método AHP é uma teoria geral de medição. Suas aplicações mais amplas são no auxílio a tomada de decisão multicritério, planejamento e alocação de recursos e na resolução de conflitos. De forma geral, três etapas orientam a solução de problemas usando o AHP: decomposição, julgamentos comparativos e síntese de prioridades. A Figura 2 apresenta as etapas do método (SAATY, 1990).

Figura 2 – Etapas principais do método AHP.



Fonte: Adaptado de Faria e Augusto Filho (2013)

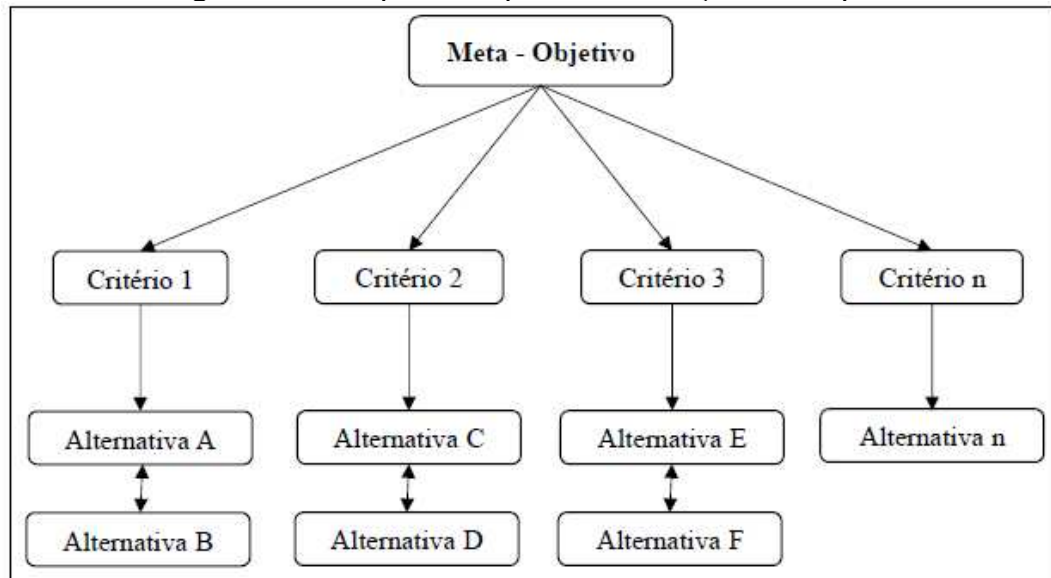
Por fim, são três as propriedades da matriz de comparação (SAATY, 1987):

- Identidade: todos os valores na linha diagonal da matriz são iguais a 1, pois representam cada elemento comparado a si mesmo, ou seja, de igual importância;
- Reciprocidade: cada valor acima da diagonal da matriz de comparação paritária é igual ao inverso do valor correspondente, situado abaixo da diagonal, isto é, $a_{ij} = 1/a_{ji}$;
- Consistência ou coerência: a matriz de comparações paritárias deve satisfazer a propriedade de transitividade. Significa que na comparação de três critérios: se A é preferível a B e B é preferível a C, conseqüentemente A é preferível a C. Se o julgamento for diferente, ou seja, C é preferível a A ou C é igual a A, o decisor foi incoerente.

2.7.1 Decomposição

Na decomposição do problema, primeira etapa no processo, a estrutura hierárquica forma uma “árvore invertida”, cujo diagrama vai descendo do objetivo geral da decisão para os critérios, subcritérios e alternativas, em níveis contínuos. Uma hierarquia simples do problema é mostrada na Figura 3.

Figura 3 – Exemplo da etapa de Estruturação Hierárquica



Fonte: Bezerra, 2019.

O princípio da decomposição é aplicado estruturando um problema simples em níveis hierárquicos, “do mais geral (e às vezes incerto) ao mais particular e concreto” (SAATY, 1990). Nessa estruturação do problema “são representados os critérios a serem avaliados e suas alternativas consideradas relevantes no processo de decisão, tais como atores, cenários, fatores climáticos e outros elementos que podem ser dados pela experiência e a intuição” (BEZERRA, 2019).

2.7.2 Julgamentos

Na etapa de julgamentos comparativos, os especialistas realizam comparações par a par entre os critérios e alternativas. Cada julgamento representa a dominância de um indicador da coluna à esquerda sobre um indicador na linha do topo. A escala recomendada pelo autor no método vai de 1 a 9, 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 (SAATY, 1994).

Comparações pareadas são fundamentais no uso do AHP. Os julgamentos, que são representados por números da escala fundamental, são usados para fazer as comparações, cujos valores ímpares (1, 3, 5, 7 e 9) são os mais comumente utilizados. A escala fundamental é mostrada no Quadro 6.

Quadro 6 – A escala fundamental de Saaty (1987)

Valores numéricos	Termos verbais	Explicação
1	Igual importância	Duas 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 e 8	Valores importantes intermediários	Quando se procura uma condição intermediária entre duas definições.

Fonte: Adaptado de Saaty (1990)

Os especialistas, ao realizarem os julgamentos, devem se fazer a pergunta “Quanto mais o Critério 1 é preferível ao Critério 2?” Se o Critério 1 é preferível 7 vezes mais do que o Critério 2, então o valor atual 7 é inserido na posição a_{ij} . O valor $1/7$ é inserido automaticamente na posição de transposição a_{ji} . O número de julgamentos necessários para uma matriz particular de ordem n é $n \times (n-1) / 2$, porque os elementos localizados na linha diagonal são iguais à unidade e pelo princípio da reciprocidade, isto é, $a_{ij} = 1/a_{ji}$ (SAATY, 1987).

2.7.3 Autovetor

Na terceira etapa, priorização e síntese, são considerados e calculados todos os pesos dos diferentes níveis estruturantes (critérios e subcritérios) dentro da matriz AHP. O método mostra as diferentes prioridades que compreende a resolução de um problema. Entende-se por prioridade uma unidade abstrata ou mensurável que pode ser usada em qualquer nível da matriz, onde da comparação de preferências por parte dos indivíduos envolvidos na resolução do problema transforma e interliga os aspectos intangíveis em Aspectos tangíveis (TAQUEZ, 2017).

De acordo com Abay, Barbieri, Woldearegay (2011) o objetivo dessa etapa é determinar um conjunto de prioridades ou 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. O cálculo dos pesos dos critérios envolve as seguintes operações:

- 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.

2.7.4 Análise de consistência

A integridade, qualidade ou coerência dos julgamentos é realizada por meio do cálculo do autovalor. Essa análise também é denominada análise de sensibilidade e indica se os julgamentos estão logicamente relacionados. Saaty (1990) propôs o seguinte procedimento:

- Estima-se inicialmente o autovalor máximo (λ máx) por meio da Equação 2. Para que a matriz de comparação seja considerada consistente faz-se necessário que o λ máx seja igual ou muito próximo ao número de linhas (ou colunas) da matriz de comparações paritárias n . Quanto mais próximo λ máx for de n , mais consistente será o resultado.

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

(Equação 2)

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

- Determina-se o Índice de Consistência (IC), por meio da Equação 3:

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

(Equação 3)

O IC indica quanto o autovalor calculado difere do valor teórico esperado.

- Determina-se a Razão de Consistência (RC), por meio da Equação 4. Nesta etapa, o índice de consistência (IC) é comparado com o índice de consistência aleatória (CA), com a finalidade de analisar se a razão de consistência é aceitável.

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

(Equação 4)

O valor do índice de consistência aleatória (CA) representa aquele que seria obtido em uma matriz de comparações paritárias de ordem n , na qual não fossem realizados julgamentos lógicos, preenchendo-se os elementos com valores aleatórios (FARIA, 2011).

Saaty (1980) calculou o índice de consistência aleatória para uma amostra de 500 matrizes recíprocas positivas, de ordem de até 10 por 10, geradas aleatoriamente, encontrando os valores apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Valores de consistência aleatória (CA) em função da ordem da matriz

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Índice de Consistência Aleatória (CA)	0	0	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Fonte: Saaty (1980)

A faixa de CR varia de acordo com o tamanho da matriz, isto é 5% para uma matriz 3x3, 8% para uma matriz 4x4 e 10% para todas as matrizes maiores que 5x5 (CHENG e LI, 2001) Para valores maiores que 0,10, recomenda-se que o problema seja estudado e os julgamentos revisados.

2.7.5 Valoração global

A escolha final da alternativa é feita por meio de uma soma ponderada, expresso pela Equação 5.

$$V(a) = \sum_{j=1}^n p_j \times v_j(a),$$

(Equação 5)

sendo,

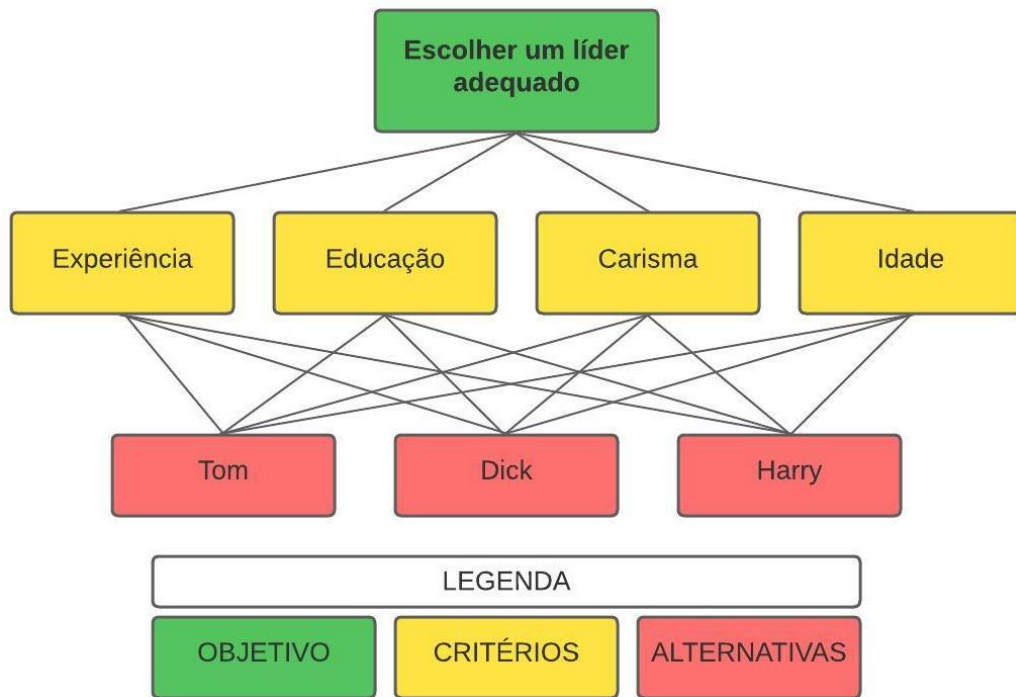
$$\sum_{j=1}^n p_j = 1 \text{ e } 0 < p_j < 1 \text{ (} j = 1, \dots, n \text{)}.$$

Onde $V(a)$ corresponde ao valor global da alternativa analisada, p_j corresponde à importância relativa do critério j e v_j ao nível de preferência da alternativa analisada no critério j .

Assim obtém-se os subsídios consistentes para tomada de decisão em relação a um problema complexo.

Usando o exemplo de Batista (2019), cujo escopo é escolher o líder mais adequado para uma companhia considerando-se três candidatos, será explicado de forma didática e simples as etapas do método AHP. Inicialmente, a Figura 4 mostra a estrutura hierárquica montada para a resolução do problema, onde o processo AHP determina as prioridades para os candidatos em relação aos critérios, e prioridades para os critérios em relação ao objetivo.

Figura 4 – Estruturação do problema, conforme exemplo de Batista (2019)



Fonte: Adaptado de Batista (2019).

Após a estruturação do problema, faz-se as comparações pareadas empregando a escala fundamental do AHP e as informações disponíveis sobre o cenário de decisão. O valor do julgamento situado à esquerda do número 1, é o “valor atual”, já os situados a direita é o valor recíproco. Assim, o julgamento abaixo da linha diagonal unitária refere-se ao quanto o elemento na linha é mais importante do que o elemento da coluna. A Tabela 2 mostra o resultado das comparações para os candidatos (subcritérios), considerando o critério “Experiência”. Exemplificando o que acima fora descrito, nota-se que o candidato “Dick” está na escala 4 (destacado em azul) de importância em comparação com o candidato “Tom”, expressando uma maior preferência pelo candidato “Dick”, no critério “Experiência”.

Tabela 2 – Comparações par a par para o critério “Experiência”

CRITÉRIO: Experiência			
Candidatos	TOM	DICK	HARRY
TOM	1	1/4	4
DICK	4	1	9
HARRY	1/4	1/9	1
SOMA	21/4	49/36	14

Partindo para o cálculo do autovetor, a Tabela 3 mostra o resultado do processo (destacado em azul). Primeiro, divide-se a valor da célula pela soma da coluna, obtendo uma nova matriz, esse processo é chamado de normalização. Segundo, calcula-se a média dos elementos de cada linha, cujo resultado é o autovetor da matriz.

Tabela 3 – Cálculo do autovetor, para o critério “Experiência”

CRITÉRIO: Experiência				
Candidatos	TOM	DICK	HARRY	MÉDIA LINHA
TOM	0,19	0,18	0,29	21,7%
DICK	0,76	0,73	0,64	71,7%
HARRY	0,05	0,08	0,07	6,6%
SOMA COLUNA	1,00	1,00	1,00	100%

O próximo passo é determinar a consistência dos julgamentos. Dessa forma, tem-se o cálculo do Índice de consistência (IC) e da Razão de Consistência (RC), como descrito anteriormente. A Tabela 4 apresenta o resultado do cálculo, em que apontou coerência aceitável na matriz, devido o valor de RC ser inferior a 0,1 (10%).

Tabela 4 – Resultado da análise de consistência para o critério “Experiência”.

Análise de Consistência	
Ordem da matriz	3
Autovalor máximo (λ máx)	3,06
Índice de Consistência aleatória (CA) – conforme tabela X	0,52
Índice de Consistência (IC)	0,03
Razão de Consistência (RC)	0,06

Dessa forma, realizado todo o processo de comparações paritárias para cada um dos critérios e subcritérios, seguido da análise de sensibilidade, Batista (2019) obteve os autovetores que estão dispostos na Tabela 5.

Tabela 5 – Resultado dos pesos de critério e subcritério do exemplo de Batista (2019).

CRITÉRIOS	PESOS (%)	SUB-CRITÉRIOS	PESOS (%)
Experiência	54,7%	Tom	21,7 %
		Dick	71,7 %
		Harry	6,6 %
Educação	12,7%	Tom	18,8 %
		Dick	8,1 %
		Harry	73,1 %
Carisma	27%	Tom	74,3 %
		Dick	19,4 %
		Harry	6,3 %
Idade	5,6%	Tom	26,5 %
		Dick	67,2 %
		Harry	6,3 %

Por fim, determina-se a prioridade global, obtida de maneira direta via operações básicas ao longo da estrutura hierárquica. Por exemplo, a prioridade global de Tom em relação ao objetivo final:

$$PG = (0,271 * 0,547) + (0,188 * 0,127) + (0,703 * 0,270) + (0,056 * 0,015)$$

$$PG = 0,119 + 0,024 + 0,201 + 0,015 = 0,358.$$

Seguindo o cálculo da prioridade global dos candidatos pelo método AHP, Batista (2019) chegou à conclusão de que o candidato Dick seria o candidato mais adequado a assumir o cargo de líder, com base nos 4 critérios definidos anteriormente.

2.8 Suscetibilidade a movimento de massa com abordagem semiquantitativa

2.8.1 Exemplo aplicado na Bacia do Rio Paquequer (RJ)

Meirelles *et al* (2018) desenvolveu um mapa de suscetibilidade a movimentos de massa na Bacia do Rio Paquequer (RJ), através de análise multicritério AHP e Média Ponderada. Para isso, foram selecionados 10 condicionantes na geração de eventos gravitacionais. Para obtenção dos pesos desses critérios (nível 1), foi aplicada a técnica AHP, cujo resultado dos pesos obtidos pela AHP está apresentado na tabela 6.

Tabela 6 – Pesos obtidos pelo método AHP para Bacia do Rio Paquequer (RJ).

VARIÁVEIS	PESOS (AHP)
Declividade	22,7
Uso e Cobertura do solo	16,3
Forma do Terreno	13,8
Prox. a Estradas	9,7
Prox. a Drenagens	9,7
Pedologia	6,1
Morfologia do Relevo	6,1
Formação Superficial	6,1
Geologia	6,1
Orientação	2,5

Fonte: Meirelles *et al*, (2018)

Para obtenção dos pesos dos sub-critérios (nível 2), foi realizada uma tabulação cruzada entre os 914 pontos de movimentos de massa mapeados e cada um dos mapas dos condicionantes. Posteriormente, 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, representando a frequência e a densidade dos movimentos de massa nas respectivas áreas.

Após a sobreposição dos mapas e geração do mapa de suscetibilidade, Meirelles *et al*, (2018) comparou os resultados obtidos com o inventário existente. Foi destacado a declividade em associação ao uso e ocupação do solo como os principais fatores predisponentes envolvidos na geração dos processos analisados.

Os autores observaram uma boa coerência com os pesos atribuídos, uma vez que os setores de suscetibilidade alto e muito alto coincidiram com os pontos de movimentos de massa conhecidos por meio do inventário. Além disso, evidenciaram a importância do uso de

softwares de SIG no gerenciamento de risco pelos órgãos responsáveis, em diferentes esferas governamentais.

2.8.2 Exemplo aplicado em São José do Jacó, Natal (RN)

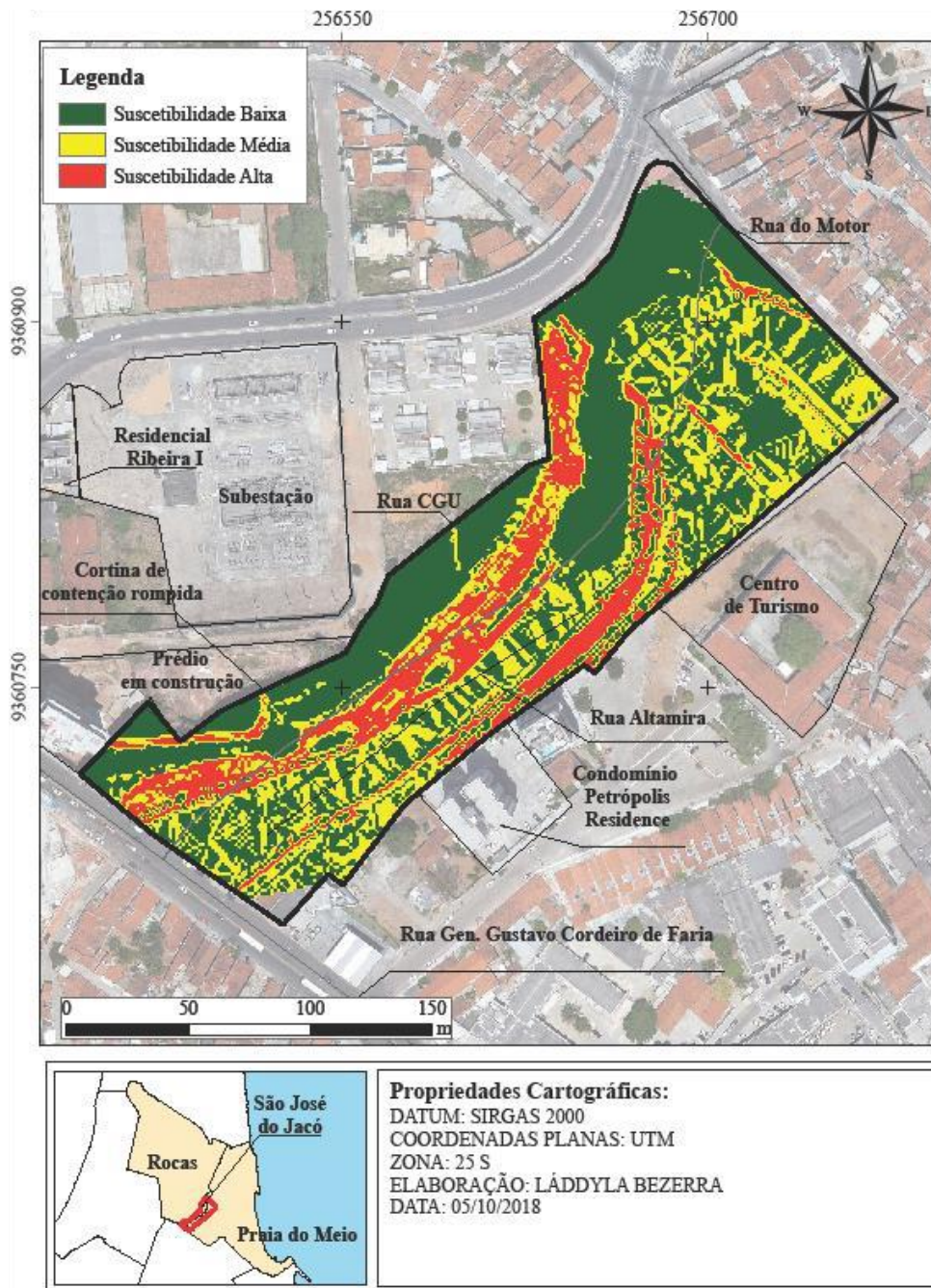
Bezerra (2019) mapeou o risco de ocorrência de movimentos de massa, na Comunidade São José do Jacó, utilizando modelo semiquantitativo proposto por Faria (2011), o qual implementa a técnica de avaliação multicritério AHP a um sistema informação geográficas (SIG). A validação do modelo foi feita através de análises de estabilidade da encosta utilizando abordagens determinística e probabilística.

A metodologia adotada para construção do mapa de risco se deu através da sobreposição dos mapas de suscetibilidade, perigo e vulnerabilidade (exposição). Dessa forma, os indicadores selecionados para a etapa de análise da suscetibilidade a movimentos de massa foram os atributos geomorfológicos (amplitude, inclinação, morfologia, tanto em planta quanto em perfil) e geológicos (material que compõe o substrato e estrutura geológica). O resultado do mapa de Suscetibilidade a movimentos de massa na Comunidade São José do Jacó é apresentado na Figura 5.

A autora observou que as classes mais brandas de suscetibilidade estão localizadas nas porções da encosta com amplitudes inferiores a 20 m, baixa inclinação (inferior a 10°), morfologia em planta divergente e/ou planar, e morfologia em perfil retilínea e/ou convexa. Já nas classes mais críticas, foram observadas amplitudes entre 10 e 20 metros e maior que 20 metros, inclinação alta (superior a 20°), morfologia em planta convergente e forma da encosta em perfil côncava.

A observação de consistentes semelhanças existentes entre o estudo de Bezerra (2019) com estudos anteriores sobre a mesma localidade, possibilita a extensão da utilização do método para demais encostas urbanas ocupadas em outras regiões que apresentem características físicas e sociais análogas aquelas observadas na área de estudo.

Figura 5 – Mapa de suscetibilidade da Comunidade São José do Jacó



Fonte: Bezerra (2019).

2.8.3 Exemplo aplicado no distrito de Ziyang, China

Bahrami *et al*, (2020) utilizou os métodos AHP e *fuzzy* e, em seguida, as curvas ROC/AUC para avaliar o desempenho do mapa de suscetibilidade. Foram consideradas sete fatores causadores de movimentos de massa, incluindo declividade, litologia, uso da terra, precipitação, distância até a falha, distância até a estrada e distância até o rio. O resultado dos pesos finais atribuídos aos fatores está apresentado na tabela 7.

Tabela 7 – Pesos obtidos pelo método AHP para distrito de Ziyang, China.

VARIÁVEIS	PESOS (AHP)
Declividade	27,4
Litologia	22,2
Uso e Cobertura do solo	17,4
Prox. a Falhas	15,4
Precipitação	9,3
Prox. a Rios	5,9
Prox. a Estradas	9,7

Fonte: Bahrami *et al*, (2020)

A principal vantagem destacada pelos autores entre a lógica *fuzzy* em relação ao método AHP, é a valoração dos dados dos mapas, onde, no método AHP é preciso o agrupamento dos sub-critérios em classes, cujos limites são nítidos, e no método *fuzzy* os valores espaciais são transformados em um espaço logístico com um intervalo invariante de 0 a 1.

As curvas ROC/AUC foram utilizadas para avaliar o desempenho do mapa de suscetibilidade, produzidos pelo método AHP e *fuzzy*, cujo resultado indicou um melhor desempenho dos modelos de predição pelo método AHP, com o valor AUC de 92,4. O resultado da aplicação

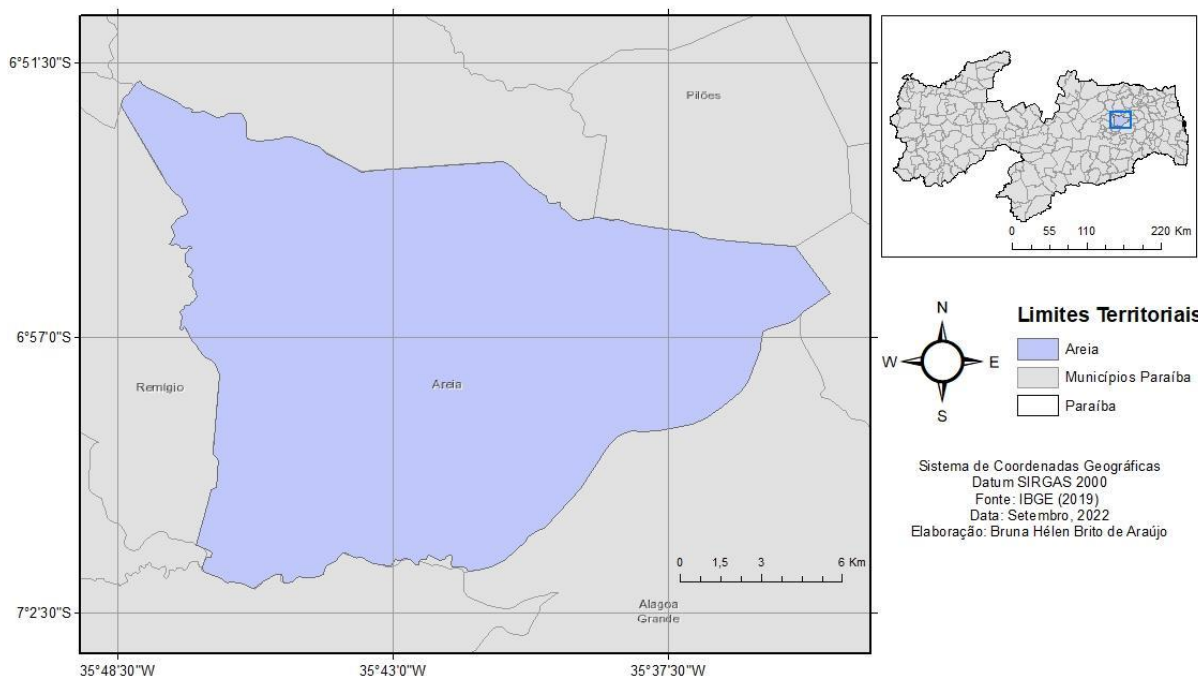
Os autores apontam como vantagem do uso do método AHP o auxílio na tomada de decisões, obtidos através da comparação parada, assim como o método *fuzzy* é preferível para fenômenos espaciais e naturais. Além disso, Bahrami *et al*, (2020) destacam a possibilidade de aplicação, com eficiência, dos modelos gerados como mapas auxiliares no planejamento territorial.

3. ÁREA DE ESTUDO

3.1 Introdução

O estudo se desenvolveu no município de Areia, estado da Paraíba, localizado na microrregião do Brejo Paraibano e na mesorregião do Agreste Paraibano. Limitada entre os municípios de Alagoa Grande, Alagoa Nova, Alagoinha, Pilões, Remígio, Serraria e Arara, Areia (PB) possui uma população de 22.633 habitantes, de acordo com o último censo (2022), e densidade demográfica de 84,10 hab/km². Distante 122,5 km da capital João Pessoa, o município possui 269,130 km² de área territorial e cerca de 2,5 km² de área urbana (IBGE, 2023). A Figura 6 mostra a localização do município no estado da Paraíba.

Figura 6 – Localização da área de estudo



Fonte: Autora (2023).

Embora tenha sido considerada uma das mais importantes cidades do estado da Paraíba, em meados do século XX, Areia (PB) se tornou dependente da sua agricultura e dos empreendimentos instalados na cidade, especialmente a Usina Santa Maria. O êxodo de moradores rurais para a cidade e a ocupação desordenada dos terrenos urbanos, provocado pela instalação da Usina, alterou a aparência urbana do município, atualmente refletido nas ocupações de encostas, vales e margens de rios (MOREIRA; MORAES, 2009). A Figura 7 mostra o resultado dessa ocupação desordenada em áreas de morro, ocupando a crista e a base do talude de corte, em toda sua extensão.

Figura 7 – Ocupação desordenada no município de Areia (PB)

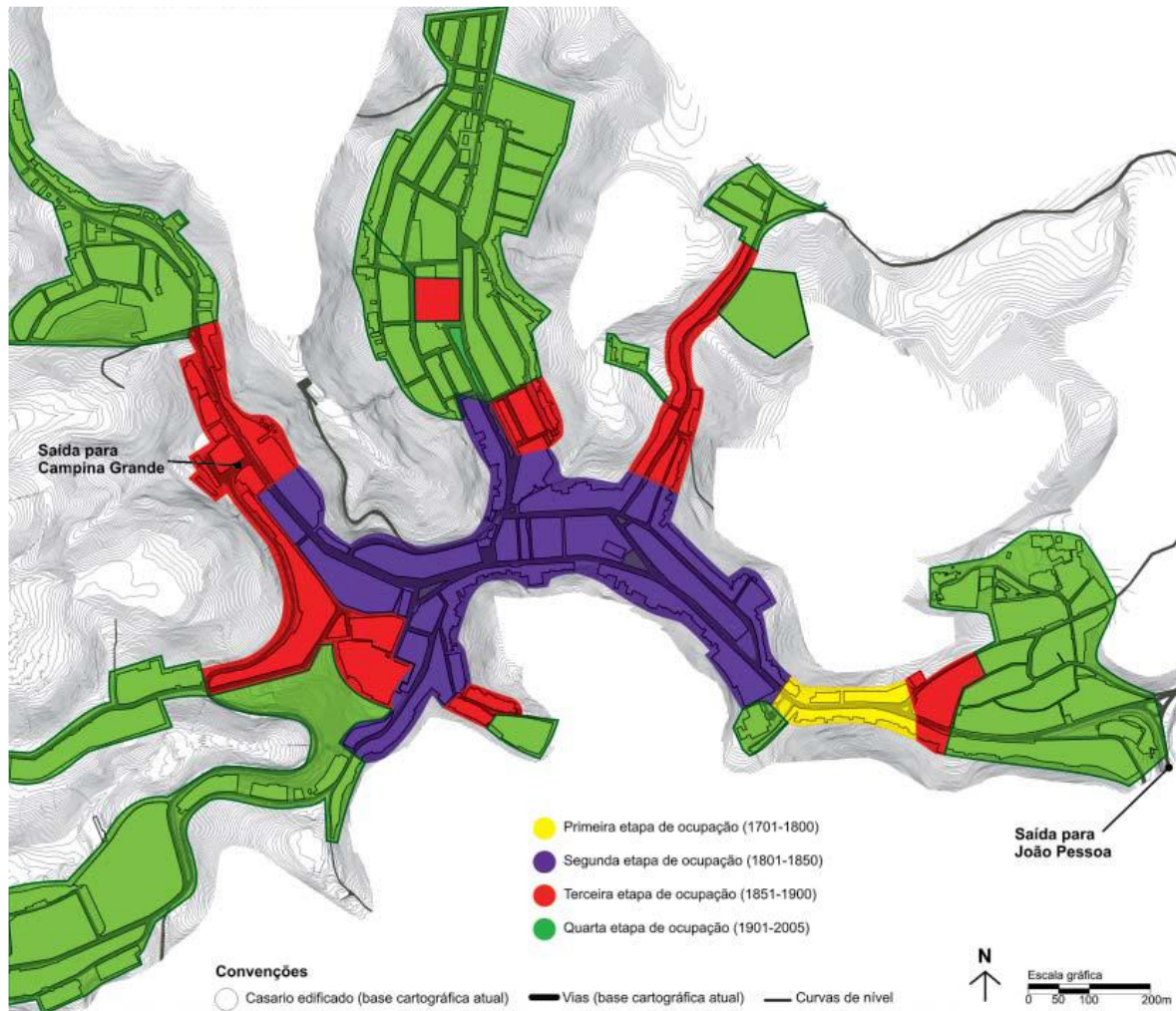


Fonte: CPRM (2015a)

Implantada sobre o relevo escarpado da serra da Borborema, o modelo de urbanização de Areia 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).

Na análise de Moreira e Moraes (2009) há poucas referências sobre o processo de crescimento e a configuração do traçado urbano de Areia (PB), tampouco acerca da relação entre a história da cidade e a configuração de sua morfologia. No entanto, os autores identificaram quatro etapas distintas do processo de crescimento do município, destacando que a ocupação das encostas, das áreas alagadiças e de preservação ambiental e cultural é um grave problema, que compromete a segurança dos moradores e a paisagem da cidade, provocando deslizamentos na estação chuvosa. A Figura 8 mostra as etapas identificadas pelos autores.

Figura 8 – Etapas do processo de crescimento urbano em Areia (1701-2005).



Fonte: Moreira e Moraes (2009).

Comparando o arranjo do sítio urbano com as variáveis geomorfométricas e ao contrapor com o adensamento urbano, tem-se que as áreas mais vulneráveis estão localizadas na mancha de explosão demográfica (1901-2005), onde coexistem construções seguras e construções problemáticas (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).

Costa (2012) cita um episódio de deslizamento ocorrido no ano de 2011, quando parte de uma encosta do Setor Oeste cedeu destruindo cinco casas e deixando muitos desabrigados. Segundo a autora, a urbanização agressiva nas encostas foi o fator chave para deflagração do evento. A Figura 9 mostra a cicatriz deixada na encosta.

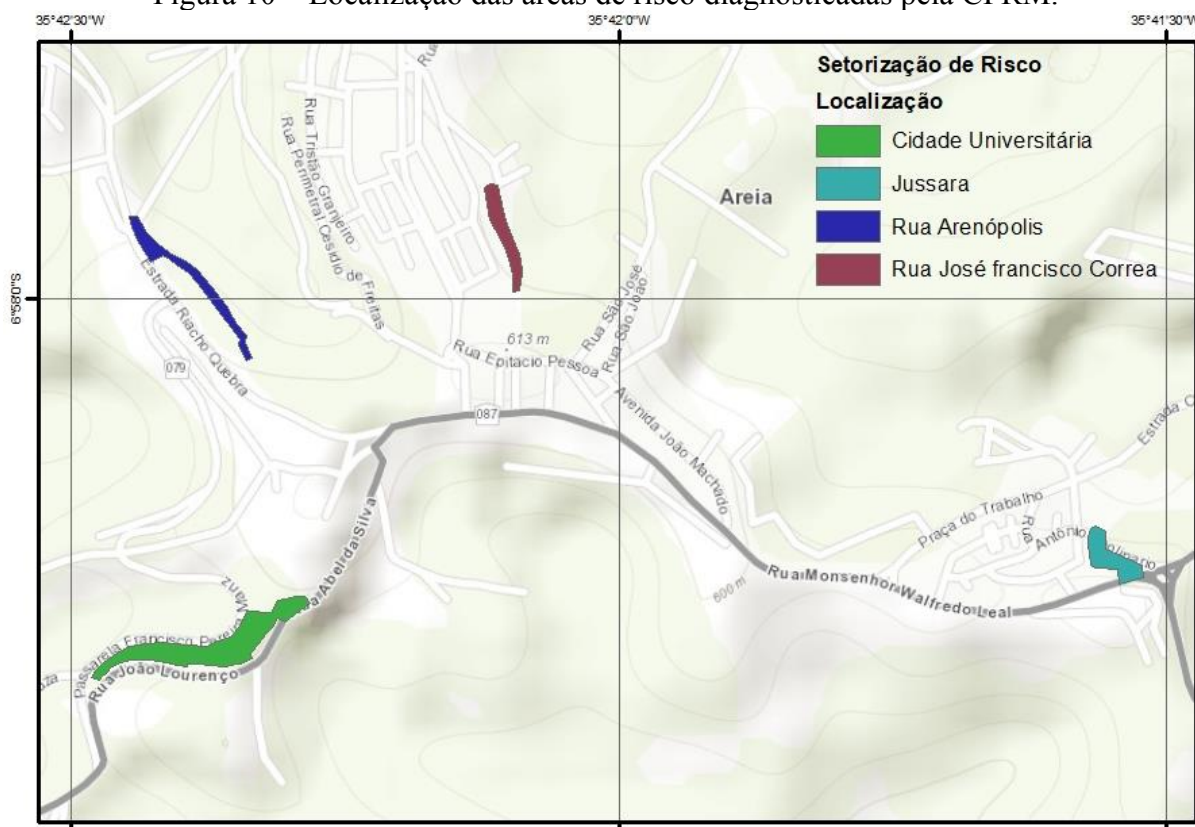
Figura 9 – Deslizamento ocorrido em Areia (PB)



Fonte: Costa (2012).

Em 2015, uma ação executada pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), identificou quatro setores de risco de movimentos de massa na área urbana de Areia (PB). O trabalho foi desenvolvido com visitas de campo às áreas, ou seja, verificou-se visualmente as condições das construções existentes nos locais e seu entorno, topografia e declividade do terreno buscando identificar os graus de risco. Também foram observadas as condições de escoamento de águas pluviais e servidas, bem como as estruturas da drenagem natural e indícios de processos geológicos, que pudessem desestabilizar as encostas do terreno. A complementação dos estudos foi feita com análises de imagens aéreas, definindo-se a área como de risco mediante o conjunto de evidências de instabilidade dentro de um mesmo contexto geográfico (CPRM, 2015a). A figura 10 mostra a localização dessas áreas.

Figura 10 – Localização das áreas de risco diagnosticadas pela CPRM.



Fonte: Adaptado de CPRM (2015a).

No ano de 2017, o município de Areia foi apontado pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), como zona de perigo de alagamentos, deslizamentos de encostas e transbordamento de rios devido à ação das chuvas. A variação climática e a intensificação da urbanização com ocupação das áreas de encostas resultaram no surgimento dessas zonas com risco de movimentos de massa no município, representando um perigo para a população e infraestrutura urbana. O município também apresenta eventos de movimentos de massa que ocorrem, em sua maioria, na estação chuvosa (LIRA, 2022).

3.2 Caracterização Geoambiental

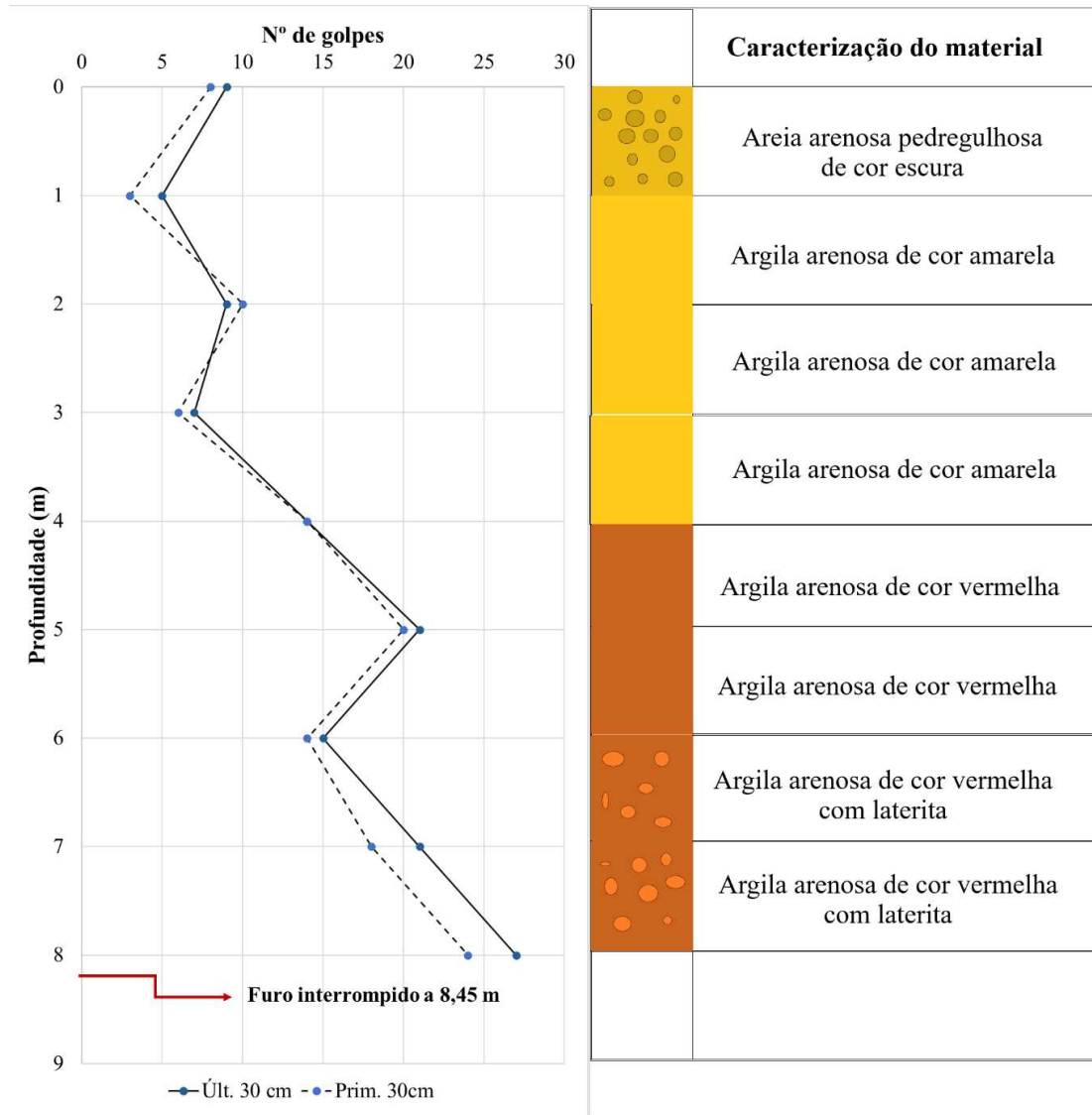
3.2.1 Aspectos morfológicos e geotécnicos

Areia (PB) tem predominância de relevo fortemente ondulado, com presença de morros, serras baixas e escarpas serranas. A existência de descontinuidade (superfícies planares) favorece a percolação de fluidos, o intemperismo e a erosão. A erosividade dos solos varia de moderada, nos solos residuais bem evoluídos, a alta, nos pouco evoluídos (CPRM, 2016).

Com base nas áreas de risco identificadas no relatório da CPRM, Lira (2022) coletou amostras em duas delas, a saber, na localidade Cidade Universitária (Rua João Lourenço - JL) e na rua José Francisco Correa (Rua Enf Maria Madalena - MM), e realizou ensaios

laboratoriais e de campo. O resultado apresentou amostras de solo heterogênea, decorrência do intemperismo sofrido. Nas sondagens dos taludes das áreas JL e MM foram observadas, de um modo geral, que as camadas de ambos os taludes são formadas por argila arenosa variando apenas sua coloração e que sua resistência cresce com a profundidade. A figura 11 apresenta o perfil de sondagem do talude MM (LIRA, 2022).

Figura 11 – Gráficos SPT do talude MM

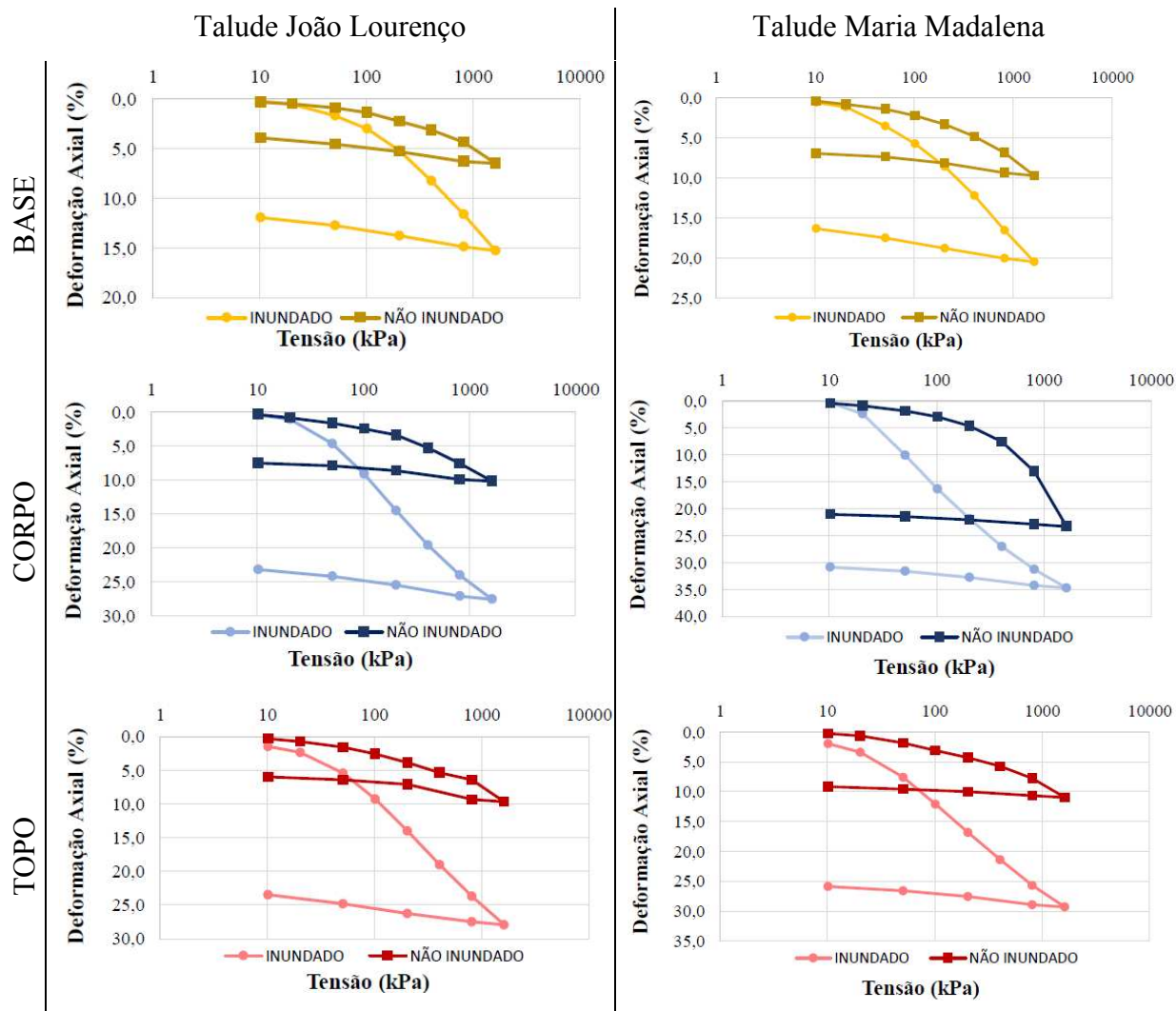


Fonte: LIRA (2022).

Sousa (2020) também estudou o solo presente nas áreas de risco identificadas pela CPRM, onde observou a presença de solos residuais, colapsíveis e bastante compressíveis na área urbana do município, mediante caracterização geológica, ensaios de laboratório e de campo. Os solos analisados, quando inundados, apresentaram perda total da parcela de coesão, indicando que estes solos são instáveis, principalmente na presença de água. A figura 12

apresenta as curvas de compressão edométrica no estado inundado e não inundado, evidenciando o potencial de colapso desses solos.

Figura 12 – Sobreposição das curvas de compressão edométrica.



Fonte: Sousa (2020).

Visando uma determinação mais precisa, a autora citada realizou ensaio de potencial de colapso, onde foi calculado o PC% de cada solo. O solo é considerado colapsível quando o PC (%) é maior do que 2% (VARGAS, 1978). O resultado mostrou que todos os solos, de ambos os taludes, foram considerados solos colapsíveis, com PC% variando de 3,63%, no corpo do talude João Lourenço, até 13,06%, no corpo do talude Maria Madalena.

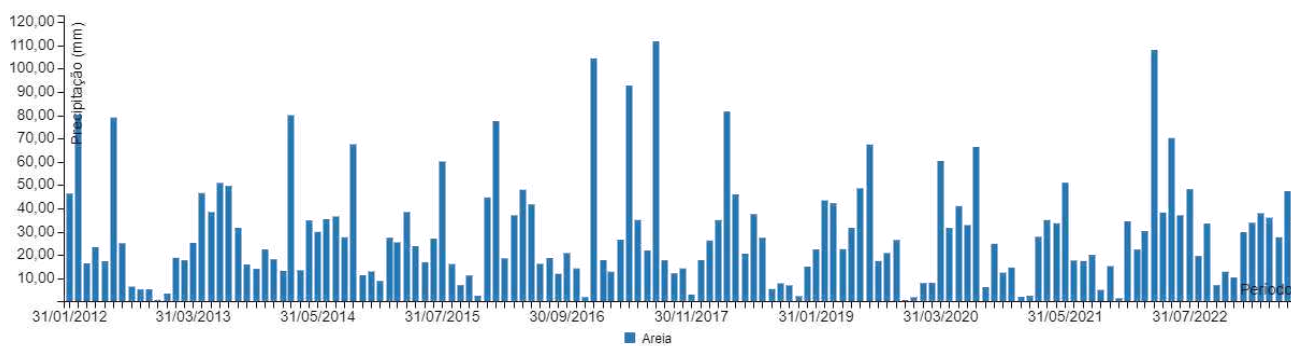
3.2.2 Aspectos climáticos

O município de Areia–PB está inserido no cenário de Brejo de altitude, que são denominações dadas para regiões semiáridas, marcadas por um clima tropical úmido ou subtropical de temperaturas amenas. Predominantemente

coberto pela vegetação de Floresta Ombrófila Aberta, estacional e floresta seca de transição, tal como ocorrente no Planalto da Borborema (IBGE, 2012; Santos *et al*, 2019).

O clima é do tipo 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, 2015a). De acordo com a classificação de Köppen-Geiger, possui clima do tipo As (tropical com chuvas de inverno), com precipitação média anual de aproximadamente 1100 mm e temperatura variável entre 15°C e 30°C. A estação chuvosa se inicia em janeiro/fevereiro com término em setembro, podendo chegar até outubro (AESA, 2012). A figura 13 apresenta a precipitação ao longo do ano dos últimos 10 anos no município.

Figura 13 – Precipitação da última década no município de Areia (PB)



Fonte: AESA (2022)

3.2.3 Aspectos geológicos

A geologia do município pode ser analisada por meio das cartas geológicas de Solânea (SB.25-Y-A-IV) e Campina Grande (SB.25-Y-C-I). A unidade geológica mais representativa é o Complexo São Caetano, onde as áreas de risco do município foram observadas.

A unidade geológica Complexo São Caetano corresponde a unidade gnáissica (NP1sca) e xistosa (NP1scax). Foi caracterizada como uma sequência metassedimentar e metavulcanoclástica. De acordo com Santos (1995) rochas metassedimentares são rochas metamórficas que têm como origem uma rocha sedimentar, enquanto rochas metavulconoclástica são rochas metamórficas que se originam de rocha vulcânica composta por fragmentos ou clastos de minerais e rochas pré-existentes. Apresenta direção E-W/NE-SW, devido ao forte controle estrutural das zonas de cisalhamento (CPRM, 2015a).

As demais unidades geológicas presentes do município foram brevemente caracterizadas no Quadro 7.

Quadro 7 – Caracterização das unidades geológicas presentes em Areia (PB)

Unidade Litoestratigráficas	Litotipos/Características
Suíte intrusiva Itaporanga (NP3γ2it25)	Diorito, Granito, Granodiorito, Monzogranito, Quartzo monzonito; Evidências de mistura parcial de magmas.
Suíte intrusiva Cariris Velhos (NP1γcv)	Augen gnaiss, Granito gnáissico;
Formação Serra dos Martins (ENsm)	Arenito, Arenito conglomerático, Arenito síltico-argiloso, Laterita; Depositada sobre ambiente fluvial.
Unidade Serrinha - Pedro Velho (PP2sp2)	Augen gnaiss, Migmatito, Ortognaiss granodiorítico
Corpo Serrinha - Pedro Velho (PP2ssp2a)	Ortognaisses porfiroclásticos.
Unidade São Caetano (NP1scax)	Anfibolito, Mica xisto, Muscovita-biotita gnaiss, Muscovita-biotita xisto, Quartzito
Formação Jucurutu (NP3sjj)	Biotita gnaiss, Biotita xisto, Gnaiss, Mármore, Muscovita quartzito, Rocha calcissilicática, Xisto; Sequência de rochas metassedimentares, com pequena contribuição de metavulcânicas.
Fácies Granitóide Esperança (NP3γ2eg)	Biotita granito, Biotita-hornblenda granito, Monzogranito
Corpo Granitóide Solânea (NP3γ3sol)	Diorito, Monzogranito; Mistura parcial de magmas.

Fonte: CPRM, 2015b; CPRM 2007.

3.3 Caracterização Pedológica

De acordo com Banco de Dados de Informações Ambientais (BDIA), no município de Areia-PB, ocorrem quatro classes pedológicas: Neossolo Regolítico Eutrófico (RRe), Neossolo Regolítico Distrófico (RRd), Latossolo Amarelo Distrófico (LAd) e Argissolo Vermelho Eutrófico (PVe) (IBGE, 2022).

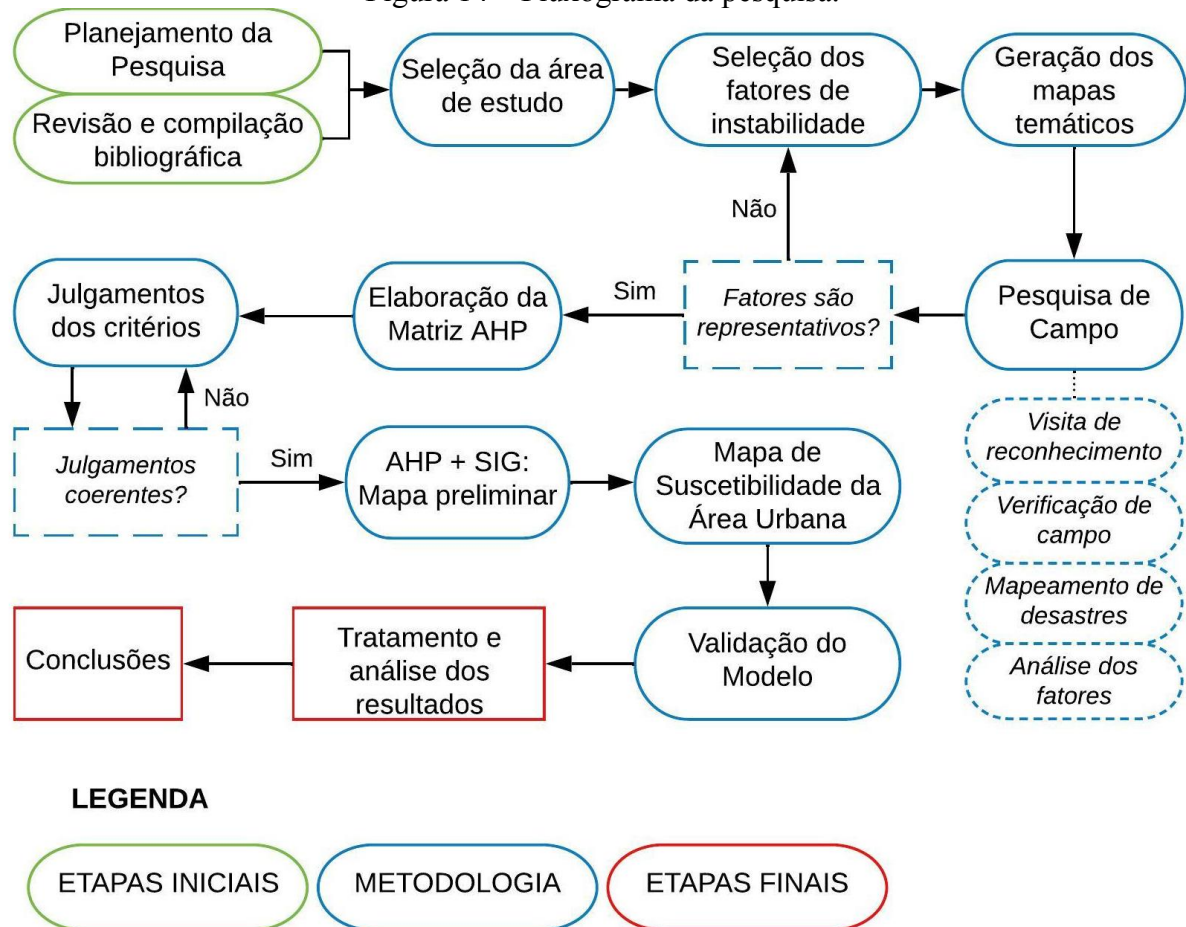
Este último representa quase 90% do território, são solos de alta fertilidade, a cor vermelha acentuada ocorre devido a teores mais altos e à natureza dos óxidos de ferro presentes no material originário, em ambientes bem drenados. O teor de argila no horizonte subsuperficial é bem maior do que no horizonte superficial, sendo esse incremento de argila percebido sem dificuldade quando se faz o exame de textura, no campo (EMBRAPA, 2021).

4. METODOLOGIA

4.1 Introdução

Os estudos realizados nesta pesquisa têm como abordagem geral a aplicação de método semiquantitativo (método AHP) baseado em SIG para mapeamento de suscetibilidade a movimentos de massa no município de Areia (PB), com base em 8 indicadores. A metodologia utilizada no desenvolvimento da pesquisa compreendeu as etapas mostradas na Figura 14.

Figura 14 – Fluxograma da pesquisa.



Fonte: Autora (2023).

Inicialmente, foi feita a caracterização do estudo, com delimitação do tema, revisão bibliográfica e definição das diretrizes. Este trabalho se trata de um estudo de caso, pois visa coletar e analisar informações de um município, estudando aspectos variados de forma qualitativa e/ou quantitativa (PRODANOV, FREITAS; 2013).

Foram selecionados os indicadores de suscetibilidade com base nos dados disponíveis e confiáveis do município em estudo, bem como foi consultada a literatura atual sobre o tema. Logo após, foram feitos trabalhos de campo para identificar locais de deslizamento e validar os fatores selecionados anteriormente. Posteriormente, por meio dos pesos dos indicadores encontrados na matriz AHP, um mapa de suscetibilidade para o município foi gerado. Após a

análise e visando maior detalhamento das áreas já ocupadas, foi gerado um Mapa de Suscetibilidade para área urbana, cuja validação foi realizada por meio da comparação das áreas com altos graus de suscetibilidade com registros históricos e estudos anteriores no município.

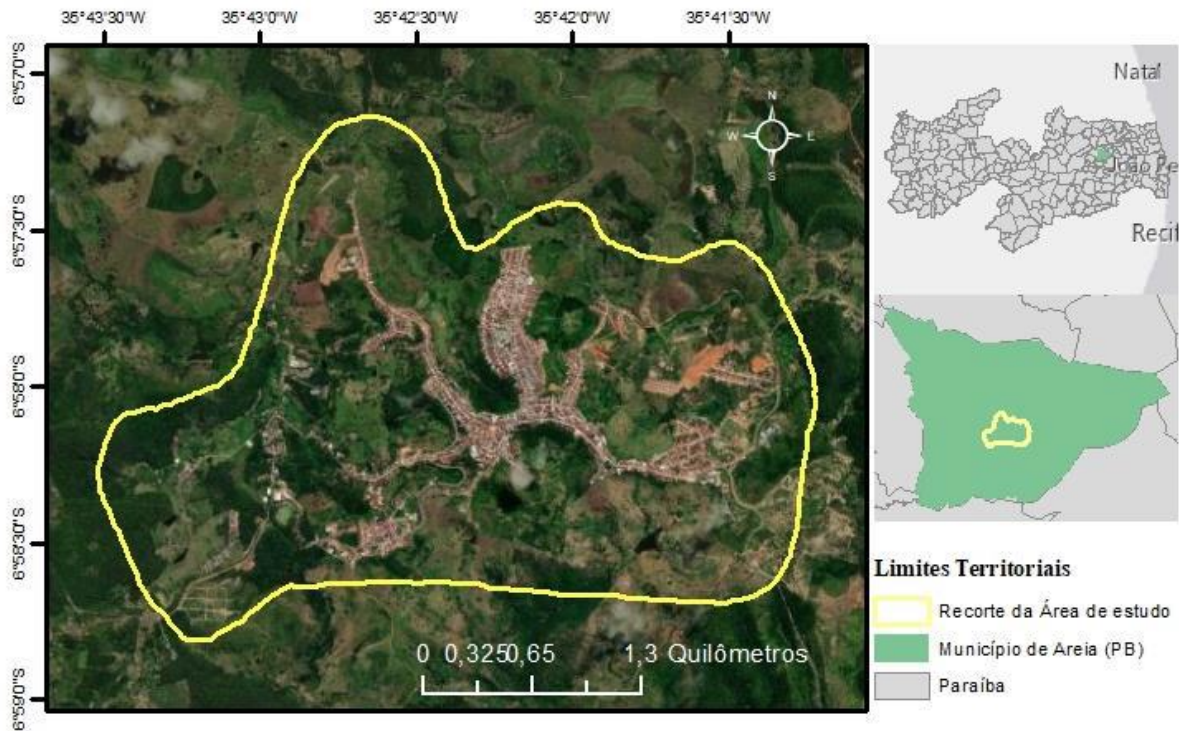
4.2 Seleção da área de estudo

Após a definição das diretrizes da pesquisa, foram feitos levantamento de informações relacionadas às áreas propensas a movimentos de massa no estado da Paraíba. Assim como grande parte das cidades do Brejo Paraibano, o município de Areia (PB) é um exemplo de região com topografia acidentada, 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. Além disso, o município carece de um plano diretor que mapeie e delimite as áreas inadequadas à ocupação.

Com isso, o município de Areia (PB) foi escolhido para aplicação do método proposto, com base nos trabalhos desenvolvidos neste município, tais como: Costa (2012), CPRM (2015a), Sousa (2020), Lira (2022), cujas pesquisas buscam expandir e aprofundar os conhecimentos acerca dos condicionantes geológicos e ambientais dos movimentos de massa ocorridos na região.

O mapa de suscetibilidade foi gerado, inicialmente, para o município inteiro, cuja localização foi apresentada no Tópico 3. Trata-se de uma primeira aproximação, no sentido de reconhecer a distribuição espacial das áreas propensas ao desencadeamento de movimentos de massa em todo o território municipal. Posteriormente, a escala de estudo foi acrescida e uma análise equivalente foi realizada dentro de um recorte da área urbana, com vistas melhorar o nível de detalhe dos resultados em uma área já ocupada. Para esta segunda análise, foi realizado trabalho de campo, com mapeamento de pontos de instabilidade, para servir de referência na elaboração do modelo. A Figura 15 mostra o recorte feito para análise, cuja referência partiu da malha territorial dos setores censitários do IBGE (2020).

Figura 15 – Localização da área de estudo.



Fonte: Autora (2023).

4.3 Seleção dos indicadores e elaboração dos mapas temáticos

Conforme Yalcin (2008) não há um padrão universal para a seleção dos parâmetros que influenciam no mapeamento de suscetibilidade a movimentos de massa. A seleção dos fatores de controle deve ser baseada na quantidade e qualidade dos dados disponíveis de cada área de estudo, a fim de fornecer confiabilidade aos produtos finais. Após a seleção, foram gerados os mapas temáticos das variáveis explicitadas nos tópicos abaixo.

Destaca-se que, para a combinação dos mapas temáticos no processo de análise multicritério, os dados de cada mapa devem ser representados numa mesma escala, portanto, devem ser normalizados, de forma a permitir a análise comparativa *pixel a pixel*. Dessa forma, todos os mapas foram elaborados em formato *raster*, com tamanho de *pixel* 30x30 e todos foram reclassificados, de modo que, cada *pixel* representa um valor numérico a ser usado nas operações matemáticas, a seguir esclarecidas.

4.3.1 Altitude

O mapa de altitude foi elaborado a partir do *Copernicus DEM (Digital Elevation Model)*, Modelo Digital de Elevação (MDE) do Programa Europeu *Copernicus*, com 30 metros de resolução espacial. O *Copernicus DEM* usou os dados do projeto TanDEM-X, MDE com resolução espacial de 12,5 metros, gerou um MDE global e disponibilizou o catálogo de dados gratuitamente (ESA, 2023). Foram adotadas 5 classes, divididas em intervalos iguais.

4.3.2 Declividade

O mapa de declividade derivou-se do *Copernicus DEM*, utilizando a ferramenta “*Slope*” do programa ArcGIS, expresso em porcentagem. As classes de declividade do terreno foram distribuídas conforme Embrapa (1979), cuja divisão é apresentada na tabela 8.

Tabela 8 – Classes de declividade conforme Embrapa (1979).

INDICADOR	DECLIVIDADE (%)	RELEVO
Declividade	0 a 3	Plano
	3 a 8	Suave Ondulado
	8 a 20	Ondulado
	20 a 45	Forte Ondulado
	45 a 75	Montanhoso
	Acima de 75	Escarpado

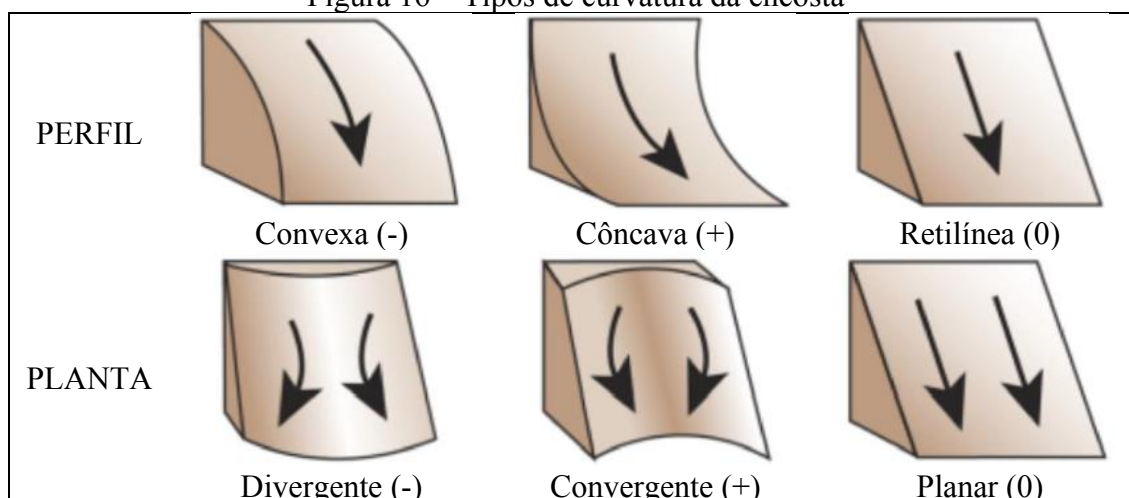
Fonte: EMBRAPA (1979)

4.3.3 Morfologia em planta e em perfil

As variáveis de curvatura do terreno foram divididas em morfologia em planta (curvatura horizontal) e em perfil (curvatura vertical), cuja elaboração partiu do *Copernicus DEM*, utilizando a ferramenta “*Curvature*” do ArcGIS, acessada através do *3D Analyst Tools*.

Para identificar se a forma da encosta em planta era convexa/côncava/retilínea, e em perfil, divergente/convergente/planar, observou-se o sinal atribuído ao valor de curvatura resultante no *raster*. Valores negativos (-) indica uma superfície convexa/divergente, valores positivos (+) indica superfície côncava/convergente e valores próximos a zero (0) apontava a existência de uma encosta retilínea/planar. A Figura 16 exemplifica a configuração das encostas conforme o tipo de curvatura.

Figura 16 – Tipos de curvatura da encosta



Fonte: ESRI (2019).

4.3.4 Geologia

O mapa geológico da área de estudo foi elaborado a partir da interpretação de mapas de litoestratigrafia, disponibilizados no portal do Serviço Geológico do Brasil (CPRM, 2015a), e do mapa de geodiversidade do Paraíba (CPRM, 2016). O município é constituído por 10 unidades geológicas, são elas Complexo São Caetano (NP1sca), Corpo Granitóide Solânea (NP3γ3sol), Suíte intrusiva Itaporanga (NP3γ2it25), Corpo Serrinha - Pedro Velho (PP2sp2a), Complexo Serrinha - Pedro Velho (PP2sp2), Formação Jucurutu (NP3sju), Fácies Granitóide Esperança granítica (NP3g2eg), Suíte intrusiva Cariris Velhos (NP1gcv), Unidade São Caetano, micaxisto (NP1scax) e Formação Serra dos Martins (ENsm).

4.3.5 Uso e cobertura do solo

Para este indicador 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. O projeto visa a elaboração de um mapeamento de vulnerabilidade natural e ambiental e de aptidão agrícola das terras, gerando, com isto uma base para o planejamento ambiental, o estabelecimento de diretrizes, ações prioritárias para projetos e implantação de políticas públicas. As classes mapeadas foram conferidas e vetorizadas manualmente, com intuito de melhorar a precisão do produto final. Tal aferição envolve a identificação de um conjunto de locais amostrais que são visitados *in loco* e um procedimento estatístico aplicado ao produto final da classificação da imagem digital. Os dados de campo foram obtidos pelo registro de 523 pontos com aparelho GPS e análise do tipo de uso e cobertura vegetal presente no local (ANDRADE, PEREIRA; 2018).

Conforme o projeto citado, 11 classes de cobertura foram definidas: Vegetação de Porte Florestal, Vegetação de Porte Arbustivo, Reflorestamento, Pastagem, Solo Exposto, Corpo Hídrico, Área Construída e Culturas Agrícolas, subdivididas em cultivo de bananeiras, cana-de-açúcar, citros e goiabeira. A definição para cada classe foi mostrada no quadro 8.

Quadro 8 – Definição das classes de uso e cobertura da terra do município de Areia (PB)

Vegetação de Porte Florestal	Floresta ombrófila aberta; ilhas de floresta úmida inseridas na região semiárida e envoltas pela vegetação da Caatinga.
Vegetação de Porte Arbustivo	Vegetação de baixa densidade, com indivíduos de porte até 6 m, aproximadamente.
Reflorestamento	Plantios ou formações de maciços monoespecíficos, sejam eles compostos por espécies florestais nativas ou exóticas.
Pastagem	Áreas com espécies de herbáceas e arbustos, quase sempre gramíneas com valor forrageiro.

Solo Exposto	Áreas sem vegetação, sem culturas agrícolas, ou com culturas em estágios iniciais de desenvolvimento, além de terras preparadas para plantio, subsolo exposto, aterros e áreas degradadas
Corpo Hídrico	Cursos de água e canais, corpos d'água naturalmente fechados, sem movimento e reservatórios artificiais.
Área Construída	Zona urbana e outras áreas de uso intensivo, estruturadas por edificações e sistema viário
Culturas Agrícolas	Cultivo de bananeiras, cana-de-açúcar, citros e goiabeira.

Fonte: Adaptado de Andrade e Machado (2018).

4.3.6 Distância para Estradas

Considerando as regiões próximas as estradas como mais críticas, o mapa de distância para estradas foi elaborado por meio da ferramenta “*Euclidean Distance*” do ArcGIS, utilizando o produto de Rodovias do Brasil, da base de dados AESA, como principal referência (AESA, 2020).

Para análise de proximidade de estradas, considerou-se importantes as vias principais de acesso ao município e estradas de acesso às zonas rurais. Dessa forma, alguns ajustes manuais foram necessários, sendo utilizado o “*Google Earth Pro*” para modelagem.

4.3.7 Distância para Drenagem

Análogo ao mapa de estrada, as regiões mais próximas dos cursos d'água foram consideradas como as mais críticas. O mapa de distância para drenagem foi elaborado, por meio da ferramenta “*Euclidean Distance*” do ArcGIS, tendo como referência o produto de Drenagem Principal do Brasil, da base de dados da AESA (AESA, 2020).

4.4 Trabalhos de campo

Os trabalhos de campo foram realizados com o apoio da Secretaria do Meio Ambiente da Prefeitura Municipal de Areia (PB), que forneceu recurso para as visitas aos locais de movimentação recorrente das encostas, com base nas denúncias da própria população.

O objetivo da pesquisa de campo foi mapear esses pontos de instabilização, além de fazer o reconhecimento do terreno, validar as informações encontradas nos mapas temáticos gerados em SIG e entender se os fatores escolhidos eram representativos para aquela região. O levantamento foi feito apenas na área urbana.

As coordenadas longitudinais e latitudinais dos locais do extremo 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.

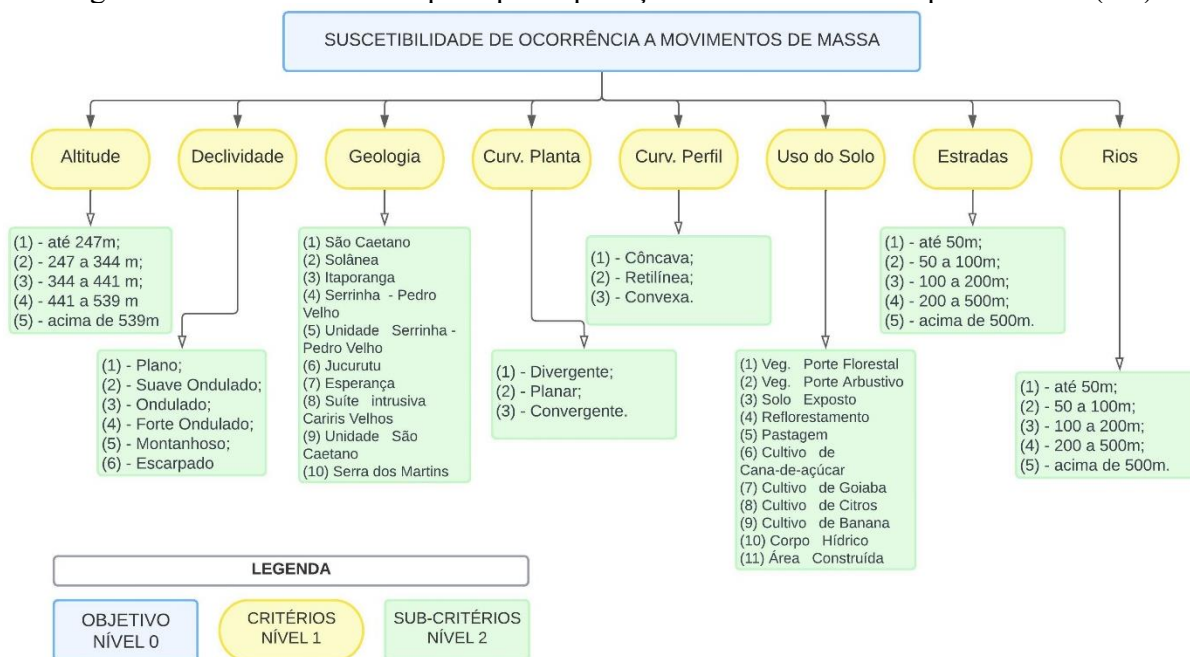
A pesquisa de campo também forneceu subsídio para elaboração da matriz AHP, no que se refere a valoração dos critérios de instabilidade, mencionados no item anterior. Dessa forma, foram analisados os pontos de ocorrência dos movimentos de massa relacionando-os com as condições topográficas, geológicas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

4.5 Elaboração da matriz AHP

4.5.1 Peso dos critérios (Nível 1)

Após a definição dos condicionantes geológico-geotécnicos e ambientais dos processos de movimentos de massa, aqui denominados de indicadores de suscetibilidade, a etapa seguinte é a estruturação dos níveis hierárquicos, característico do método AHP. A Figura 17 ilustra a estrutura da matriz, constituída pelo objetivo principal (Nível 0), pelos indicadores de suscetibilidade (Nível 1) e suas classes (Nível 2).

Figura 17 – Estrutura hierárquica para aplicação da AHP no município de Areia (PB)



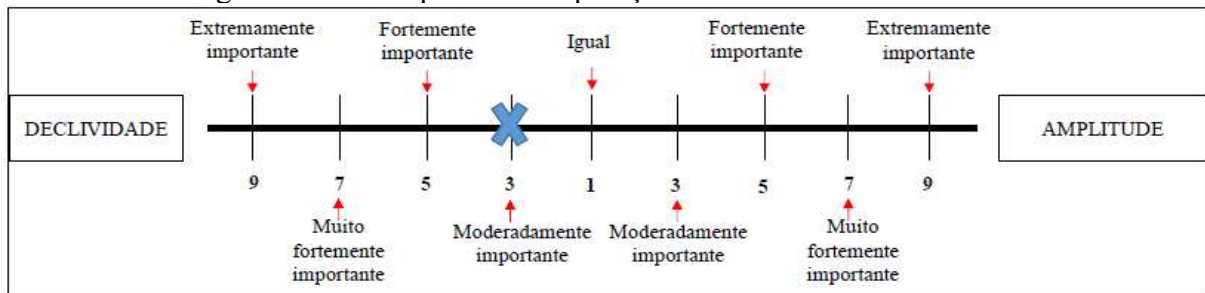
Fonte: Autora, 2023

O julgamento da importância dos indicadores, foi feito pela autora deste trabalho em consenso com especialistas na área temática, baseado na experiência de outros estudos de movimentos de massa, no conhecimento do município em estudo e no mapa de inventário que foi desenvolvido por meio dos trabalhos de campo. Dessa forma, outros 2 engenheiros civis foram consultados.

O procedimento de atribuição dos pesos, etapa de julgamentos paritários, foi realizada para o nível hierárquico 1, com valores variando de 1 a 9, conforme a escala de Saaty, cujos

valores ímpares (1, 3, 5, 7 e 9) são os mais comumente utilizados e os valores pares são utilizados quando não há consenso entre os avaliadores. De acordo com as propriedades da matriz (SAATY, 1987) e considerando um total de 8 indicadores selecionados, 28 comparações em pares foram realizadas. A Figura 18 explica um exemplo deste procedimento para o nível hierárquico 1 dos indicadores de suscetibilidade declividade *versus* amplitude.

Figura 18 – Exemplo das comparações realizada no método AHP



Fonte: Bezerra (2019).

Uma vez conhecido os julgamentos dos indicadores e seguindo a sequência de aplicação do método AHP, foram realizados os processos de normalização da matriz de comparação, dividindo o valor de cada célula pela soma da sua respectiva coluna. A média aritmética de cada linha é o autovetor, ou seja, os valores da importância que cada indicador tem na influência da suscetibilidade a movimentos de massa.

Como etapa final do método AHP, foi feita a análise de consistência dos pesos obtidos, por meio do cálculo da Razão de Consistência (RC) que, conforme apresentado no Tópico 2, deve ser igual ou inferior a 10%, para que seja considerada aceitável.

4.5.2 Pesos dos sub-critérios (Nível 2)

Os critérios Amplitude, Declividade, Morfologia, Estradas e Drenagem são de natureza quantitativa, isto é, cada *pixel* que compõe o mapa temático dessas variáveis possui um valor numérico, ao contrário dos critérios Uso e Cobertura do solo e Geologia, cujo valor do *pixel* é representado nominalmente. Dessa forma, para que seja feita a combinação de mapas no processo de análise multicritério dentro do SIG, todos os dados devem ser representados de forma numérica e também devem estar em uma mesma escala, portanto, devem ser normalizados, de forma a permitir a análise comparativa *pixel a pixel*.

Assim, para os critérios quantitativos, a uniformização da escala de variação foi feita agrupando os dados em classes e atribuindo pesos de 1 a 5 para cada uma, sendo valores próximos a 5 mais crítico na suscetibilidade a movimentos de massa.

Para os critérios qualitativos, aplicou-se a técnica utilizada por Meirelles *et al.* (2018), cujo resultado é a transformação dos planos de informação em uma escala padrão de

mensuração, com o objetivo de apresentá-los de forma quantitativa. Para isso, os dados espaciais 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.

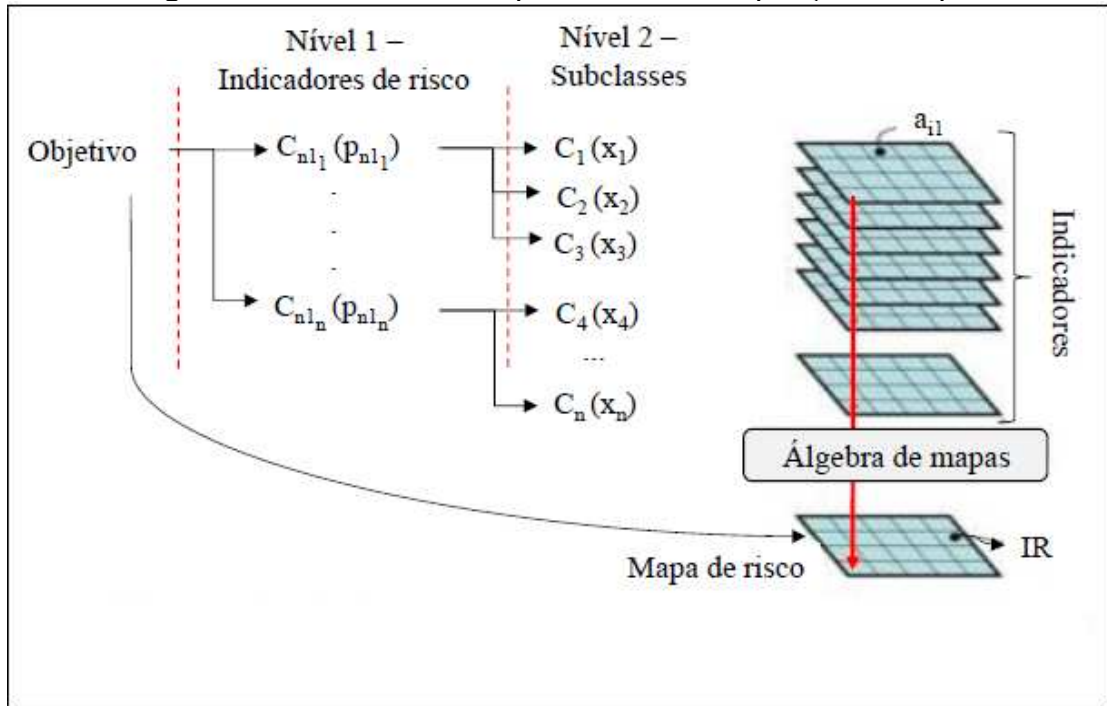
Dessa forma, os 11 sub-critérios do indicador Uso do solo foram reclassificados variando de 1 a 5, em ordem crescente de influência na suscetibilidade a movimentos de massa. Isto é, considerando que a falta de vegetação contribui para a instabilização de encostas, essas classes foram consideradas mais críticas na análise, recebendo valor 5.

Para a classificação das unidades geológicas, foi realizado o estudo e interpretação dos tipos de solo predominantes em cada unidade, utilizando a publicação do IBGE (2019), cujo conteúdo identifica os graus de potencialidade a movimentos de massa das várias litologias mapeadas pelo instituto. Os valores de suscetibilidade variam de 1, representando o menor grau de potencialidade, a 5, o de maior grau.

4.6 Mapa Preliminar: Zoneamento de Suscetibilidade

Com os pesos obtidos, tanto para o nível hierárquico 1 quanto para o nível 2, e os mapas temáticos gerados no SIG, o mapa preliminar de suscetibilidade foi produzido, por meio da sobreposição dos mapas, procedimento semelhante a pesquisa de Bezerra (2019), que realizou o mapeamento do risco de ocorrência de movimentos de massa para Comunidade São José do Jacó, Natal (RN). Esta metodologia combina os dados *raster, pixel a pixel*, gerando um novo mapa com dados dependentes dos fatores de instabilidade e dos pesos atribuídos a eles. A Figura 19 exemplifica o esquema do procedimento realizado. Este processo de sobreposição de mapas também foi utilizado para gerar o mapa final de suscetibilidade na área urbana.

Figura 19 – Procedimento esquemático da sobreposição de mapas



Fonte: Bezerra (2019)

Os critérios do nível 1 (C_{n1}) são os indicadores de suscetibilidade (amplitude, declividade, geologia etc) e os do nível 2 (C_{n2}) seus respectivos sub-critérios. Para cada critério do nível 1 foi atribuído um peso oriundo do AHP, p_n , assim como para cada subcritério, x_n , conforme método explicado no item anterior. 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 = valor normalizado do sub-critério, respectivo ao critério n.

4.7 Mapa de Suscetibilidade da Área urbana

Com o mapa preliminar no município de Areia (PB) elaborado, a escala do estudo foi ampliada e foi dado enfoque na área urbana, com o intuito de obter informações mais detalhadas sobre a área ocupada e fornecer subsídios para a tomada de decisão dos gestores municipais responsáveis pela gestão urbanística.

Para esta etapa, foi realizada tabulação cruzada entre os pontos de movimentos de massa mapeados e cada um dos mapas temáticos. Esta análise espacial procurou compreender a influência de cada classe das condicionantes, identificando a frequência desses eventos (ocorrência por classe/total de movimentos).

Assim, o Mapa de Suscetibilidade do município de Areia (PB) foi consolidado, conforme o procedimento de sobreposição de mapas mostrado no item anterior, sendo compatibilizado com as informações dos trabalhos de campo.

Para o gerar o produto final desta pesquisa, o mapa foi reclassificado em 5 classes de suscetibilidade em intervalos iguais (1: muito baixo, 2: baixo, 3: médio, 4: alto e 5: muito alto).

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste tópico são apresentadas as análises feitas através dos mapas temáticos obtidos com as variáveis geomorfométricas, além dos resultados dos trabalhos de campo. Também são mostrados os resultados obtidos com o Processo de Análise Hierárquica (AHP) e os mapas finais de suscetibilidade.

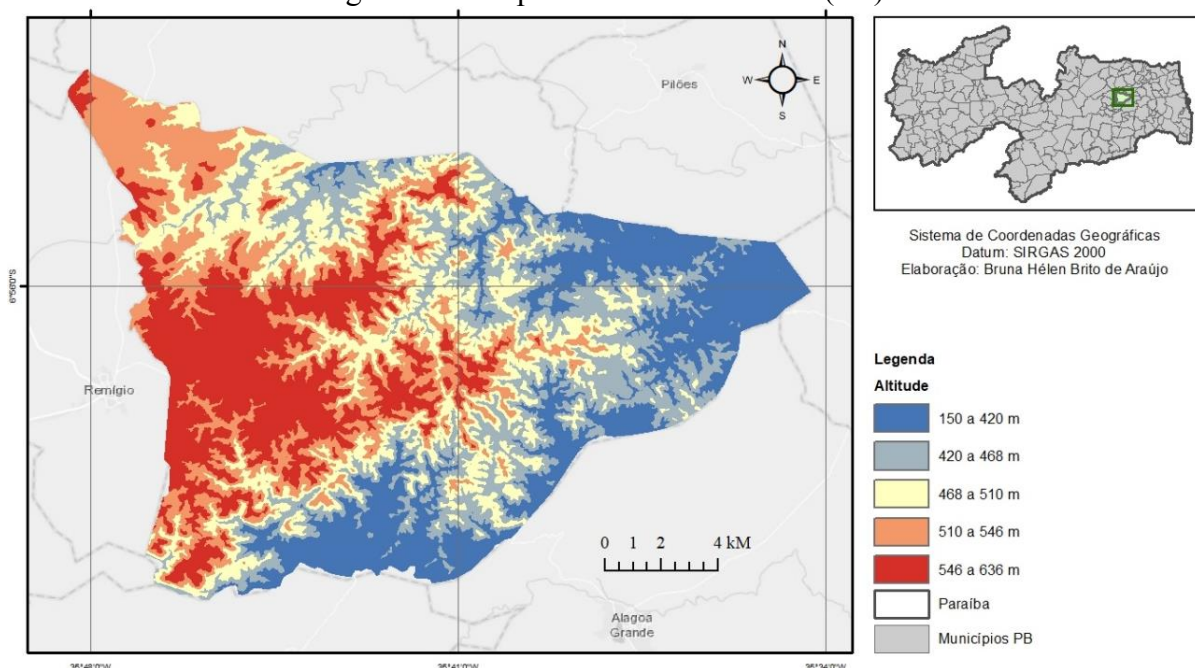
5.1 Análise geoambiental do município

Foram considerados 8 fatores que exercem papéis cruciais no controle da instabilidade de taludes e para cada um deles foi gerado um mapa temático. A partir destes, buscou-se compreender a influência de cada indicador na suscetibilidade aos movimentos de massa.

A Figura 20 apresenta o mapa de altitude do município, onde se observa valores bastante elevados, representados em vermelho. As altitudes variam de 150 m, no sudeste do município, a 636 m, no centro-oeste, onde está localizada a área urbana. Areia (PB) está situada no início do Planalto da Borborema, região com altitudes normalmente elevadas. Mais da metade do território areiense, aproximadamente 52%, possui altitudes acima de 468 m.

Especialistas afirmam que os movimentos de massa estão fortemente ligados à elevação. Entretanto, não existe uma relação direta entre ambos. Estudos sugerem que regiões mais elevadas nem sempre são as mais suscetíveis a ruptura (Zhang *et al.*, 2016), isso implica que os graus de suscetibilidade para elevação são influenciados por outros fatores, como o uso e cobertura do solo, por exemplo. É o que ocorre em regiões cuja ocupação se desenvolveu em áreas mais elevadas.

Figura 20 – Mapa de Altitude de Areia (PB).



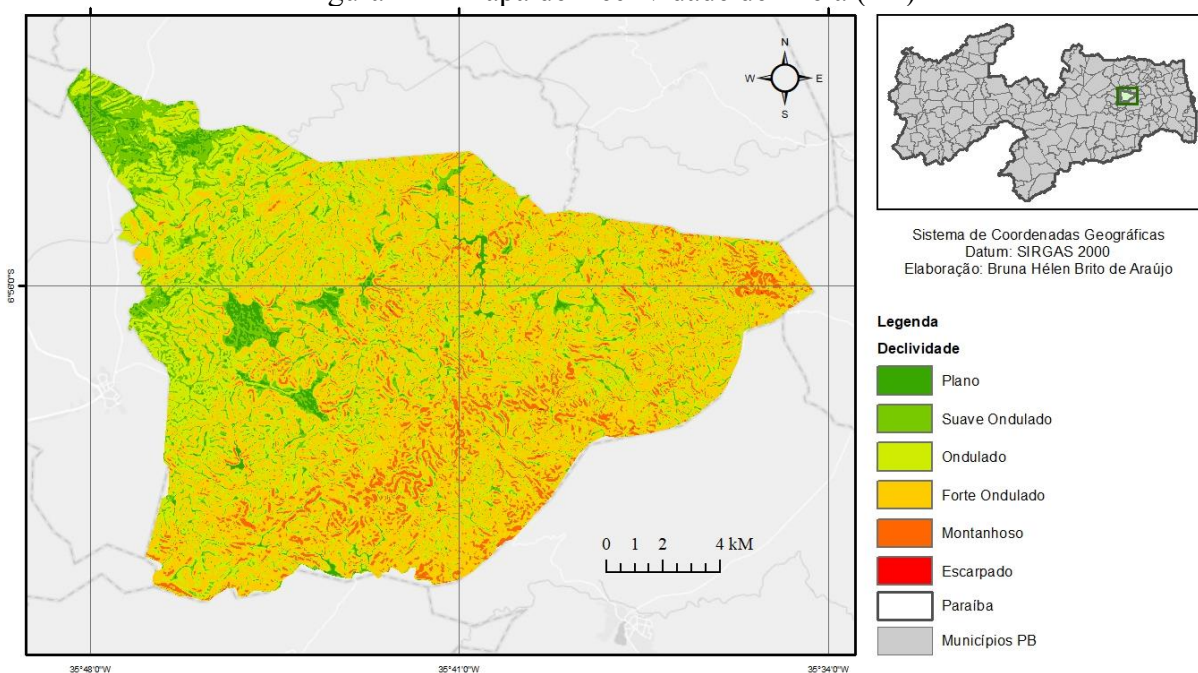
Fonte: Autora (2023).

O mapa de declividade, mostrado na Figura 21, evidencia o relevo fortemente ondulado, com vales profundos e estreitos dissecados. Quase toda a extensão do município apresenta declividades acima da classe de 8 a 20%, o que a Embrapa (1979) considera como fortemente ondulado. Cerca de 54% da área do município apresenta declividades de 8 a 20%, 14% apresenta declividades de 20 a 45%, e 1% corresponde a declividades maiores de 45 a 75%. Destaca-se que as maiores declividades se estendem na região centro-sul do município, incluindo o centro urbano onde encontram-se as encostas do balneário “O Quebra” com vertentes atingindo próximo a 70% de inclinação.

As tensões cisalhantes da massa de solo são influenciadas, entre outros fatores, pela declividade. Quanto mais íngreme a inclinação, menor o fator de segurança do talude (SAADATKHAH, KASSIM, LEE, 2014). Em contrapartida, Varnes (1984) cita que muitas encostas bastante íngremes formadas por rochas consolidadas são mais estáveis que encostas de inclinação mais suave compostas por materiais pouco resistentes, resultado dos processos físico-químicos sofridos.

A declividade é citada como fator mais importante nas análises de estabilidade de taludes (YALCIN, 2008), portanto, é indispensável. Contudo, vale ressaltar a importância de serem feitas associações com outras condições do local analisado, visto que a instabilidade é condicionada a interação de uma série de parâmetros. Para o caso do critério “declividade”, sugere-se analisar juntamente com os critérios de uso do solo e geologia.

Figura 21 – Mapa de Declividade de Areia (PB)



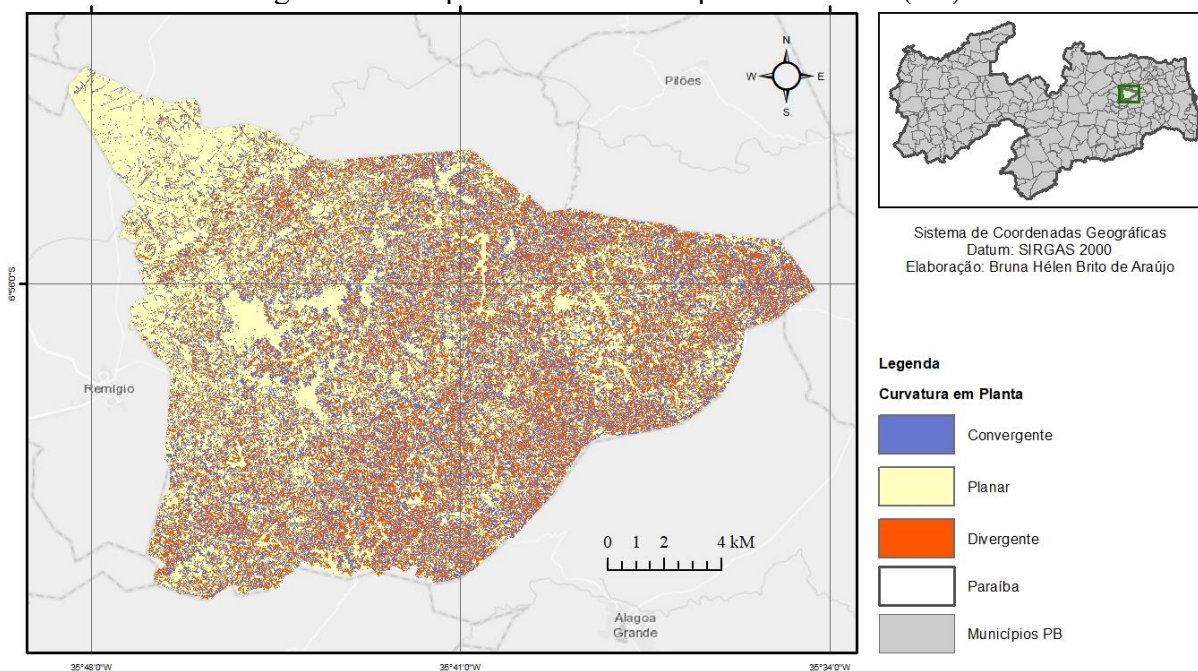
Fonte: Autora (2023).

A Figura 22 apresenta o mapa de curvatura em planta do município de Areia (PB). É possível perceber alguns aglomerados de formato planar ao oeste do município, região de altitudes elevadas, o que evidencia as áreas de platôs, típicos do Planalto da Borborema. Fazendo uma simples observação ao mapa, não é possível distinguir as áreas onde predominam formatos côncavas ou convexas, confirmando um terreno extremamente acidentado. Contudo, fazendo uma análise dentro do ambiente SIG, constata-se que as áreas divergentes e muito divergente, áreas onde o escoamento superficial diverge e a dissecação é mais acelerada, são maioria.

Em geral, as curvaturas das encostas se referem à geometria da superfície, e é melhor interpretada quando associado a condições hidrológicas. Vertentes convergentes são definidas como coletoras de água, sendo potencialmente mais instáveis, devido à retenção e preservação da umidade. Já as vertentes divergentes são consideradas mais estáveis, pois considera-se que distribuem o escoamento uniformemente pela encosta. Assim, as áreas de encostas convergente têm maior probabilidade de incidência dos movimentos de massa do que áreas divergentes (MEZUGHI *et al*, 2012).

Sob o ponto de vista geotécnico, o comportamento de um maciço de solo, entre outros fatores, é função da concentração de água existente, o que favorece a saturação do solo e o aumento da poropressão, aliviando assim as tensões normais efetivas e provocando a redução da resistência do solo (BEZERRA, 2019).

Figura 22 – Mapa de curvatura em planta de Areia (PB).



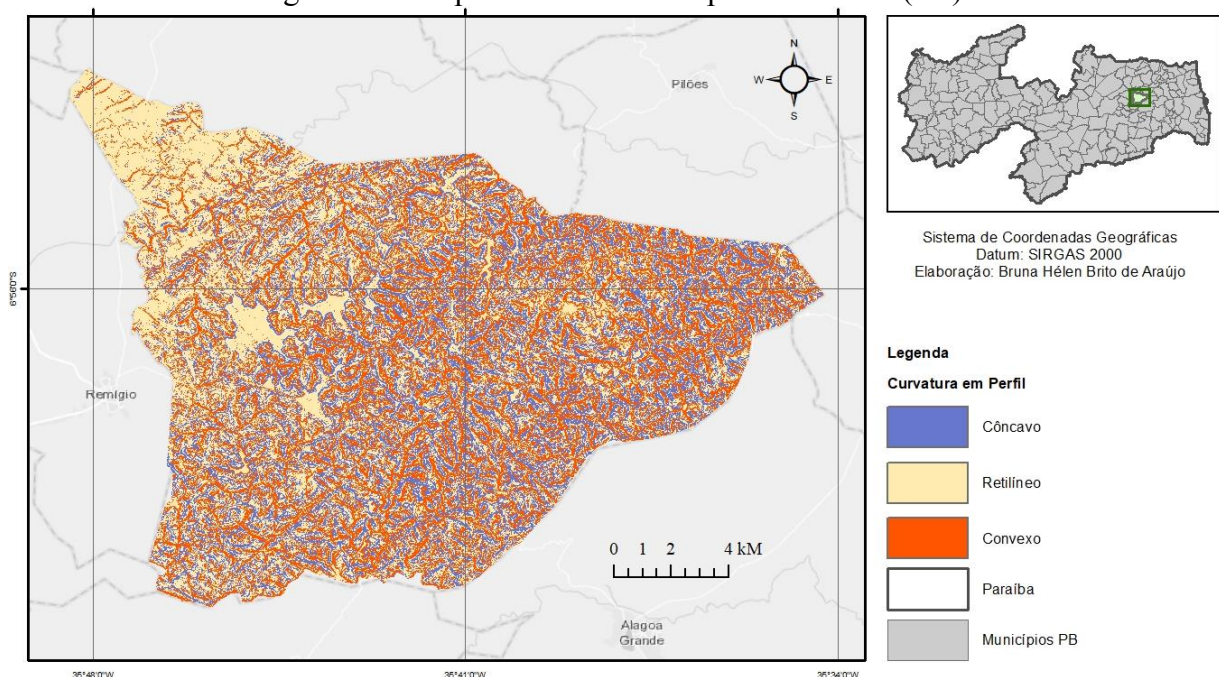
Fonte: Autora (2023).

A Figura 23 apresenta o mapa de curvatura em perfil do município estudado. Análogo ao mapa de curvatura em planta, a maioria são perfis que variam de convexos a muito convexos, caracterizado pela probabilidade de gerar fluxos difuso com velocidade crescente, potencializando o transporte de material dendrítico e, conseqüentemente, favorecendo o cisalhamento do solo.

A redução da resistência ao cisalhamento é um dos mecanismos de deflagração dos movimentos de massa, cujos fatores podem estar associados a geometria da encosta e a estrutura constituinte (GERSCOVICH, 2016). De forma geral, os parâmetros de curvatura horizontal e vertical da encosta desempenham papel similar no favorecimento à ocorrência de movimentos de massa. Estudos sugerem pequena variação de influência desses fatores, uma vez que sua importância não é muito significativa (LIU e DUAN; 2018; FAN 2017).

A combinação entre as curvaturas da encosta representa uma caracterização das formas do terreno. O produto final da associação da curvatura vertical (côncavo, retilíneo e convexo) e curvatura horizontal (convergente, planar e divergente) estabelece nove classes distintas. Os casos extremos de combinações de curvatura são representados pela forma côncavo-convergente (máxima concentração e acúmulo do escoamento) e pela forma convexa-divergente (máxima dispersão do escoamento) (VALERIANO, 2008). Em Areia (PB), 31,5% do terreno apresenta classe côncavo-convergente, que corresponde a classe com maior vulnerabilidade aos movimentos de massa devido as zonas de convergência de fluxo e maior quantidade de material depositado (SILVA NETO, 2013).

Figura 23 – Mapa de curvatura em perfil de Areia (PB).



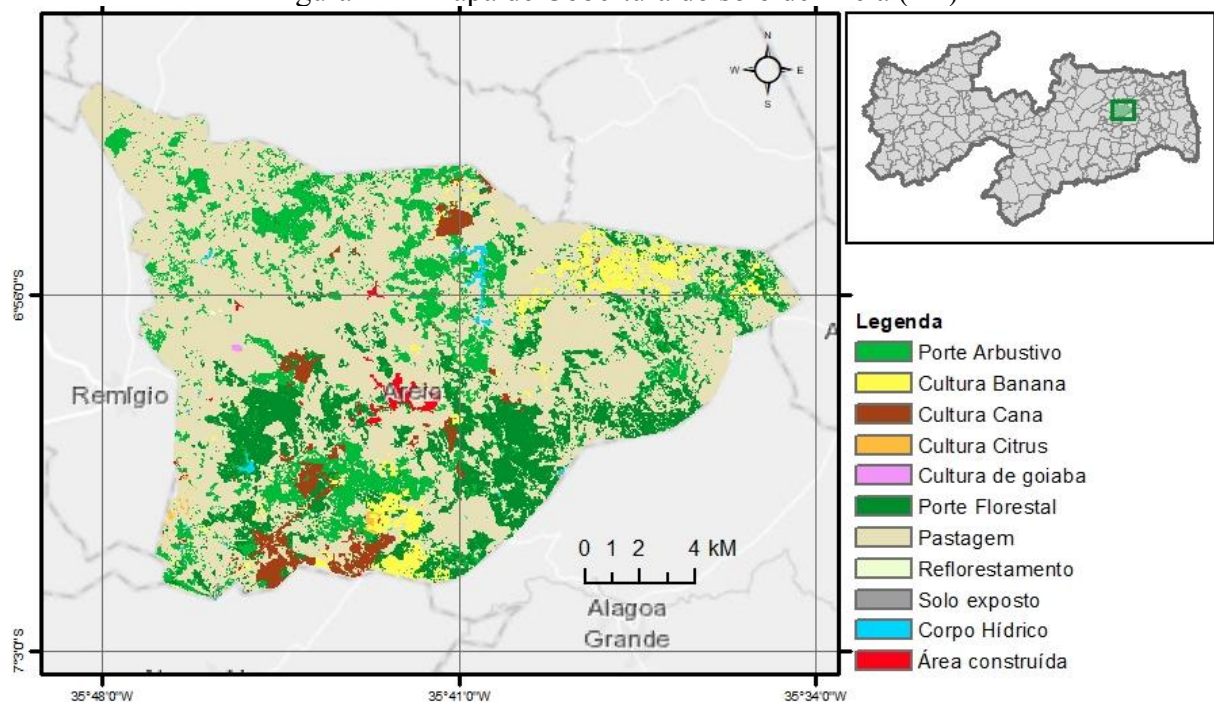
Fonte: Autora (2023).

O mapa de Uso e Cobertura da Terra, mostrado na Figura 24, demonstra que a Pastagem é predominante, cobrindo 60% do município, no período estudado. Em seguida, a Vegetação de Porte Florestal e Arbustivo são as classes mais representativas, com cerca de 16% de cobertura cada uma. A Vegetação de Porte Florestal predomina a centro-oeste e também no sudeste do município, zona de elevada declividade, que marca o início do Planalto da Borborema. As culturas mais expressivas foram as da bananeira e a cana-de-açúcar, cobrindo cerca de, 4 e 3% do município. A classe de solo exposto possui 104,91 ha, onde há coleta de material utilizado para a recuperação das estradas vicinais do município (ANDRADE, MACHADO, PEREIRA, 2018).

Com muitas riquezas naturais, a cidade possui na zona rural mais de 20 engenhos que fabricam aguardente-de-cana, mel e rapadura. Há consenso de que o desmatamento promove condições favoráveis para a instabilidade de encostas, uma vez que a remoção da cobertura vegetal torna as superfícies mais vulneráveis a processos erosivos, além de receberem maiores volumes de água precipitada sobre o solo (GERSCOVICH, 2016).

A intensidade e suscetibilidade dos movimentos de massa podem ser influenciadas em função do uso e tipo de cobertura do solo. Locais de maiores declividades com presença de áreas não vegetadas, concentrada nos fundos de vale e encostas, podem potencializar de forma significativa o risco de movimentos de massa, sobretudo pela retirada total ou parcial da sustentação do solo ao longo da elevação (MEIRELLES *et al*, 2018).

Figura 24 – Mapa de Cobertura do solo de Areia (PB)



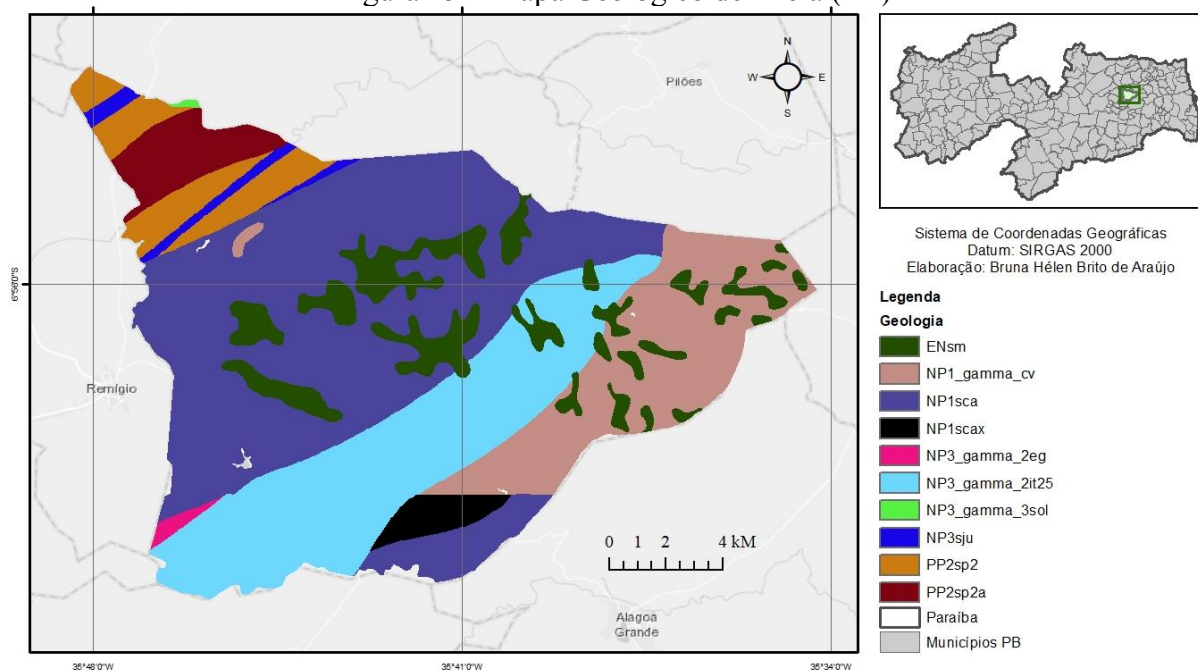
Fonte: Autora (2023).

A figura 25 apresenta o mapa geológico de Areia (PB). Nota-se o predomínio da unidade geológica Complexo São Caetano (CSC), correspondente à unidade gnáissica (NP1sca) e xistosa (NP1scax), cujo solo abrange uma sequência metassedimentar e metavulconoclástica. Conforme Santos (1995) rochas metassedimentares são rochas metamórficas que têm como origem uma rocha sedimentar, enquanto rochas metavulconoclástica são rochas metamórficas originadas de uma rocha vulcânica composta por fragmentos ou clastos de minerais e rochas pré-existentes. O CSC caracteriza-se pela granulação média a fina e gradações para biotita gnaisse homogêneo (CPRM, 2015b).

Muitos pesquisadores consideram a litologia um dos parâmetros mais importante nos estudos de movimentos de massa, dada a variação do grau de suscetibilidade entre as unidades. As variações litológicas se mostram como uma condicionante fundamental para estudos de suscetibilidade, uma vez que apresentam diferenças na resistência e permeabilidade das rochas e solo (ABAY, BARBIERI E WOLDEAREGAY, 2019).

Entre os fatores intrínsecos à Geologia, a litologia se mostra como uma condicionante fundamental para estudos de suscetibilidade a movimentos de massa. No entanto, embora muito importante, a litologia mostra-se insuficiente para uma avaliação com esse viés, se utilizada como um dado isolado. Isso porque um mesmo tipo de rocha, ou litologia, dependendo das suas características genéticas ou estratigráficas, pode apresentar diferentes graus de resistência aos processos de movimentação de encostas (IBGE, 2019).

Figura 25 – Mapa Geológico de Areia (PB)



Fonte: Autora (2023).

5.2 Pesquisa de campo

Após o reconhecimento da área de estudo por meio do SIG, seguiram-se os trabalhos de campo como forma de validar as informações obtidas com os mapas temáticos.

A partir do trabalho 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 tanto no topo quanto na base de encostas. Um motivo para esse feito é a inexistência de um plano diretor, que delimite áreas impróprias para ocupação, ficando a população sem diretrizes para construir. A Figura 26 mostra uma configuração de ocupação típica do município, onde as construções se estendem do topo à base das encostas.

Figura 26 – Ocupações precárias ao longo de encostas



Fonte: Autora (2023)

O solo exposto, observado durante o trabalho de campo, são ações da própria população que promovem a limpeza de seus terrenos, removendo a proteção vegetal, acreditando ser uma ação benéfica contra o movimento de massa. Além da limpeza, foram observadas uma extensa plantação de bananeiras ao longo das encostas, com a mesma tentativa de inibir a descida de material. No entanto, é importante citar que essa vegetação favorece o movimento de massa, pois ajudam a reter água no solo, deixando-o instável (BRASIL, 2006). A Figura 27 apresenta um exemplo, muito comum no município, de solo exposto e plantação de vegetação inadequada para áreas de encostas.

Figura 27 – Parcela de solo exposto com presença de bananeiras em terrenos íngremes



Fonte: Autora (2023).

Nota-se também o uso de lonas plásticas nas áreas de morro a montante das construções. Embora o uso dessa ferramenta seja bastante comum em áreas instáveis, para minimizar o impacto das chuvas nas encostas, trata-se de uma medida paliativa, cuja substituição deve ocorrer periodicamente em locais onde a lona já sofreu desgaste. Ainda assim, a medida não protege os moradores no caso de uma movimentação de massa, pois não são capazes de promover a contenção do solo. O uso desses elementos é evidenciado na Figura 28.

Figura 28 – Uso de lonas plásticas



Fonte: Autora (2023).

Outra questão muito comum no município é a disposição de águas pluviais e servidas ao longo das encostas, direta ou indiretamente. De acordo com o IBGE (2023), apenas 41,9% dos domicílios apresentam esgotamento sanitário adequado, 35,6% de domicílios urbanos em vias públicas com arborização e 13,7% de domicílios urbanos em vias públicas com urbanização adequada (presença de bueiro, calçada, pavimentação e meio-fio). Os dados refletem na falta de alternativa à população na disposição dos seus efluentes, gerando um fluxo de água ao longo das encostas, atuando e intensificando sobretudo os processos de erosão do solo. A presença de água no solo provoca a alteração da sua resistência, como comprovou Lira (2022), em que a presença de umidade resultou na diminuição da resistência ao cisalhamento nas amostras ensaiadas em sua pesquisa.

É comum observar, ainda nos dias atuais, o início de construções no topo das encostas, sem qualquer serviço de melhoramento ou contenção do solo (figura 29), expondo ao risco tanto a construção nova, quanto as construções circunvizinhas. Algumas vezes, muros de arrimo improvisados são construídos, porém sem atender quaisquer especificações técnicas, mostrando sinais de deterioração, com presença de umidade e vegetação. Novamente, ressalta-se que a falta de um plano diretor vigente e efetivamente fiscalizado é fator preponderante para tal fato.

Figura 29 – Novas construções sem medidas de prevenção de desastres.



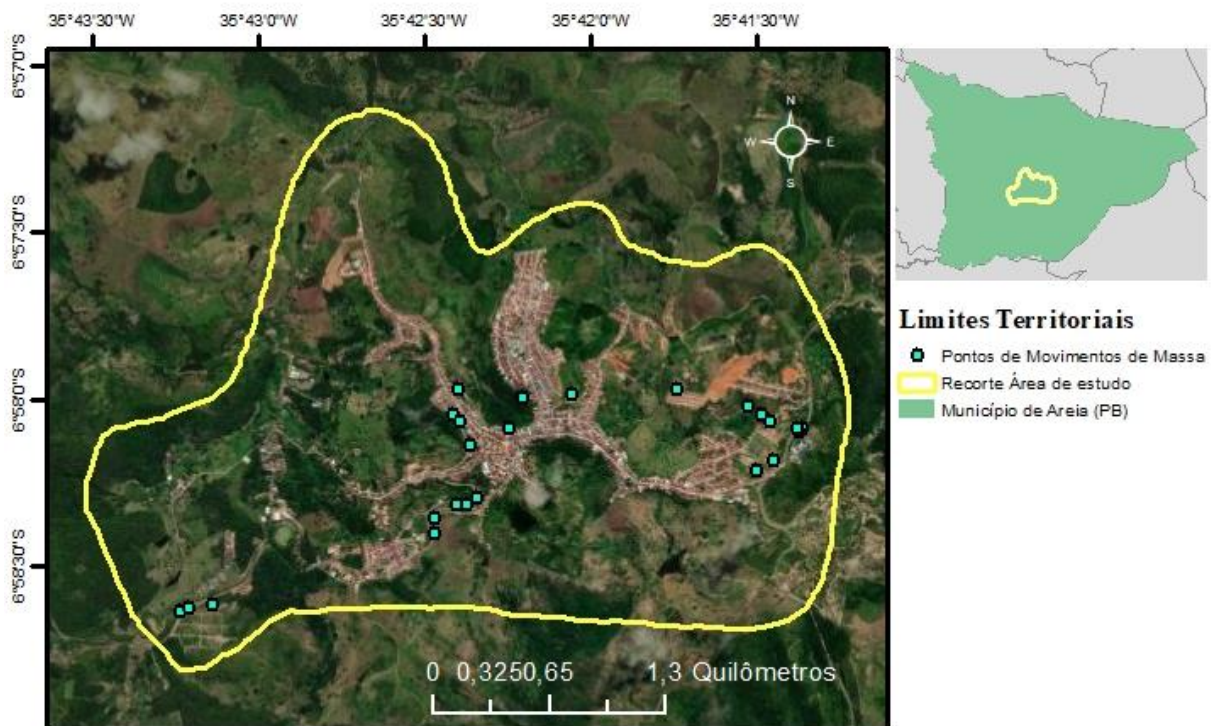
Fonte: Autora (2023).

5.3 Levantamento de Inventário

O inventário de movimentos de massa é fator preponderante em qualquer avaliação de suscetibilidade (Kamp *et al.*, 2008). Embora não exista essa informação documentada na região de estudo, foi gerado um mapa de inventário por meio de observações de campo e eventos conhecidos e denunciados pela população, sobretudo após períodos de alta precipitação.

Durante a visita, foram mapeados 24 pontos de movimentos de massas, assim como presença de feições de instabilidade, conforme a experiência e conhecimento dos moradores. Ressalta-se que os pontos mapeados foram obtidos apenas na área urbana, que é onde se tem conhecimento de ocorrências de movimentos de massas. A Figura 30 mostra a localização desses pontos.

Figura 30 – Pontos de movimentos de massa na área urbana de Areia -PB



Fonte: Autora (2023)

É possível perceber uma forte distribuição de pontos pelo município, especialmente, nas áreas de periferia, cujas áreas seguem o relevo íngreme até o fundo dos vales. No entanto, a análise visual dos dados não é capaz de explicar todos os eventos, por isso, a informações do mapa de inventário foi usado para analisar as relações entre cada fator condicionante, isto é, as classes dos critérios utilizados, e a ocorrência de movimentos.

Comparando os locais de instabilização com o modelo de expansão urbana da cidade, verifica-se que muitos pontos mapeados ocorreram em locais cujo processo de crescimento urbano ocorreu nas últimas etapas conhecidas, isto é, desde o fim de 2005 até os dias atuais.

Cerca de 50% dos pontos mapeados, concordam com a análise de Marques *et al* (2017), cujo estudo identificou três áreas na periferia com interface geoambiental problemática à ocupação (vulnerabilidade), mas que apresentam adensamento urbano (áreas de risco). São elas o Adensamento Palha (centro-sul) e Adensamento Jussara (extremo leste), cuja ocupação se instalou desde os cortes de morro para instalação das ruas existentes, até as áreas mais íngremes, acompanhando a topografia de forma problemática.

Fazendo uma correlação entre os parâmetros de controle e a distribuição dos eventos, notou-se que a maior influência incluía 4 critérios, são eles: Estradas, Geologia, Cobertura e Declividade, que correspondem aos critérios cuja localização dos pontos ocorreram em classes mais críticas.

Melo e Souza (2016) ao estudar as vulnerabilidades geomorfológicas em Garanhuns (PE), que também é um brejo de altitude, identificaram problemáticas similares a da área urbana de Areia, com relevo ondulado (8 a 20%) em forma de colinas, cotas que chegam a ultrapassar 1.000 m de altitude, e presença de vales, os quais estão tendo suas encostas utilizadas como área de expansão urbana e prática de agricultura de subsistência.

Bastos e Peulvast (2016), obtiveram resultados similares no brejo de altitude de Baturité (CE), onde foram identificados movimentos de massa somente nas áreas com declives mais significativos, que se encontram basicamente nas vertentes e no platô, sobretudo próximos de rodovias e áreas de cultivo agrícola. A geomorfologia do local, apresenta grande variedade de feições tais como relevos dissecados nas vertentes, colinas intercaladas com planícies alveolares no platô, e superfícies de erosão e de deposição nos setores circunvizinhos mais baixos (sertões e tabuleiros). Assim essas áreas necessitam que práticas sustentáveis sejam implementadas em contextos similares em todos os brejos de altitude do Nordeste do Brasil.

5.4 Matriz de decisão AHP

As comparações em pares dos indicadores de suscetibilidade, foram realizados com base na escala de julgamentos de Saaty, variando de 1 a 9. Após esta etapa, foram feitas as operações de normalização da matriz para o nível hierárquico 1 e obteve-se o peso relativo de cada indicador de suscetibilidade. Por fim, posterior a etapa de determinação dos pesos dos subcritérios, foram verificadas a coerência dos julgamentos por meio da análise de consistência, calculando o Índice de Consistência (IC). A Tabela 9 traz o resultado dos pesos e notas obtidas

para os critérios e os sub-critérios, respectivamente, que representam a ordem de importância de cada um dos indicadores de suscetibilidade na ocorrência dos processos de movimento de massa no município de Areia (PB).

Tabela 9 – Pesos obtidos para os critérios de suscetibilidade e seus subcritérios

INDICADORES	PESOS (%)	CLASSES	NOTAS
Altitude	2,6%	1 – Até 247 m	1
		2 – 247 a 344 m	2
		3 – 344 a 441 m	3
		4 – 441 a 539 m	4
		5 – Acima de 539 m	5
Declividade	20,9%	1 – Plano	1
		2 – Suave ondulado	1
		3 – Ondulado	2
		4 – Fortemente Ondulado	3
		5 – Montanhoso	4
		6 – Escarpado	5
Geologia	11,8%	1 – Complexo São Caetano	4
		2 – Corpo Granitóide Solânea	1
		3 – Suíte intrusiva Itaporanga	1
		4 – Corpo Serrinha - Pedro Velho	2
		5 – Unidade Serrinha - Pedro Velho	1
		6 – Formação Jucurutu	3
		7 – Fácies Granitóide Esperança	1
		8 – Suíte intrusiva Cariris Velhos	1
		9 – Unidade São Caetano	3
		10 – Formação Serra dos Martins	5
Curvatura em planta	6,3%	1 – Convergente	5
		2 – Planar	1
		3 – Divergente	3
Curvatura em perfil	9,2%	1 – Côncava	5
		2 – Retilínea	1
		3 – Convexa	3
Uso e cobertura do solo	26,5%	1 – Veg. Porte Florestal	1
		2 – Veg. Porte Arbustivo	1
		3 – Solo Exposto	2
		4 – Reflorestamento	2
		5 – Pastagem	3
		6 – Cultivo de Cana-de-açúcar	3
		7 – Cultivo de Goiaba	3
		8 – Cultivo de Citros	3
		9 – Cultivo de Banana	4
		10 – Corpo Hídrico	1
		11 – Área Construída	5

Proximidade de Estradas	18,4%	1 – Até 200m	5
		2 – 200 a 400 m	4
		3 – 400 a 600 m	3
		4 – 600 a 800 m	2
		5 – Acima de 800m	1
Proximidade de Drenagem	4,3%	1 – Até 200m	5
		2 – 200 a 400 m	4
		3 – 400 a 600 m	3
		4 – 600 a 800 m	2
		5 – Acima de 800m	1

Fonte: Autora (2023).

Dessa forma, percebe-se que o indicador mais significativo foi o uso do solo (26,5%), seguidos dos indicadores declividade (20,9%), estradas (18,4%), geologia (11,8%), curvatura em perfil (9,2%), curvatura em planta (6,3%), drenagem (4,3%) e, por fim, altitude (2,6%).

O resultado corrobora com a análise de Zang *et al.* (2016), cujo critério “Uso do solo” foi o mais representativo, com peso correspondente de 32,25%, 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 a área urbana de Areia (PB), onde o crescimento populacional resultou na construção de assentamentos e serviços públicos nas áreas de encostas.

Ghosh *et al.* (2011), Saadatkah, Kassim e Lee (2014) e Yalcin (2008) obtiveram resultados semelhantes. O critério “Uso do solo” figura entre os 3 maiores influenciadores dos movimentos de massa na análise desses autores, especialmente em áreas de plantações, onde ocorre a mudança da cobertura natural da terra e desmatamento progressivo, isto é, regiões associadas a interposições antrópicas.

Fazendo a mesma análise para o critério “Declividade”, Kamp *et al.* (2008) concluíram que a inclinação da encosta é um dos fatores mais importantes no desperdício de massa, cujo peso relativo obtido na pesquisa foi de 23,89%, em uma análise com outros 9 critérios. Conforme o autor, o movimento da encosta é “extremamente comum quando os taludes são mais íngremes do que o ângulo natural de repouso do substrato e quando não há coesão suficiente para inibir a ruptura do talude”.

Reforçando esse resultado, Pradhan e Kim (2016) e Kristanto *et al.* (2020) identificaram que as áreas com alto potencial de movimentos de massa são controladas, em sua maioria, pelo critério “Declividade”, admitindo que encostas com ângulo de inclinação consideravelmente íngreme, está em maior risco de ocorrência de movimentação.

Corroborando com os resultados, Mezughi *et al.* (2012) infere 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. Levando em consideração que o levantamento dos pontos de movimentação foi realizado especificamente na área urbana, já era de se esperar que esse indicador estivesse presente entre os mais importantes, assim, o parâmetro foi tratado cuidadosamente para não haver interferências negativas.

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.

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, além de representarem pouca influência no favorecimento à ocorrência de 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, pois poucos pontos de instabilização foram observados nas proximidades dos rios, o que já era uma expectativa da análise, já que poucas áreas próximas aos corpos hídricos foram observadas na cidade.

O critério “Altitude”, de forma análoga à análise de Abay *et al.* (2019), se mostrou 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. Embora todos os 24 pontos mapeados ocorrerem em altitudes entre 521 e 600 metros, acredita-se na influência de outros fatores sobre o critério “Altitude”, visto que toda a área urbana está inserida em altitude acima de 490 metros, fazendo com que o indicador altitude não causasse muita diferença nessa avaliação.

Por fim, a análise de sensibilidade mostra a coerência quanto aos julgamentos realizados pelos especialistas. Na tabela 10 é apresentado o resultado desta análise para a matriz recíproca.

Tabela 10 – Análise de sensibilidade dos indicadores

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 %

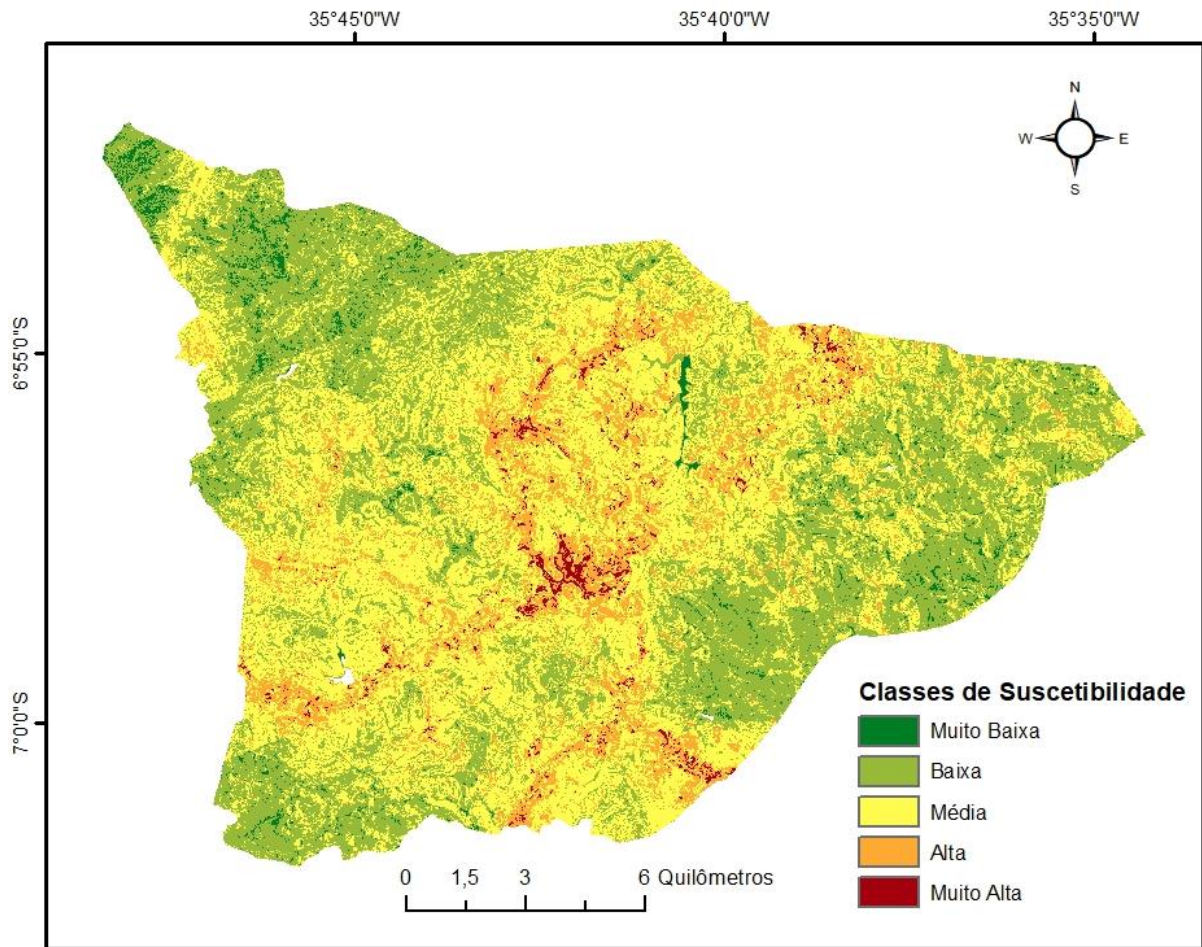
O resultado da Razão de Consistência (RC), foi inferior a 10% (8,8%) conforme recomenda a metodologia AHP proposta por Saaty, representando um nível de consistência aceitável nas comparações realizadas. Outro indicativo de coerência nos julgamentos realizados pelos especialistas é a aproximação do valor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

5.5 Mapa preliminar

Posteriormente à atribuição das notas e pesos referentes a cada plano de informação, seguida da análise da coerência, foi realizada a álgebra de mapas, onde se sobrepõe 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 iguais, variando o grau desde “Muito Baixa” a “Muito Alta” suscetibilidade. A Figura 31 apresenta o resultado da sobreposição.

O mapa de suscetibilidade à ocorrência de movimentos de massa representa um indicativo da potencialidade, primordialmente espacial, de ocorrência desses eventos. Não há relação temporal ou monetária nesta análise, uma vez que fazem parte de outros conceitos relacionados.

Figura 31 – Mapa de Suscetibilidade a Movimentos de Massa do Município de Areia (PB)



Fonte: Autora (2023).

Analisando a figura 31, constata-se que muitas áreas do município se encontram na classe de Média suscetibilidade, aproximadamente 45,9%. As classes de baixa e muito baixa suscetibilidade compreendem 40,8% da área de estudo e as classes de alta e muito alta suscetibilidade, 13,3%. De forma geral, com base na importância dos indicadores mencionados, o município apresenta níveis de suscetibilidade “baixo” e “muito baixo” distribuídos de leste a sudeste e nos extremos sudoeste e noroeste, onde predominam as áreas vegetadas, com baixos valores de declividades e altitude e baixa densidade de estradas.

Evidencia-se que a classe de suscetibilidade média está localizada nas porções do município cuja unidade geológica é o Complexo São Caetano, na direção E-W/NE-SW, assim como a unidade geológica Serra dos Martins, distribuídos a leste do município. O delineamento das estradas e as porções de áreas urbanizadas também fica evidente, tanto nas áreas de média como alta suscetibilidade. Não foi possível observar um padrão quanto ao comportamento dos atributos de drenagem e morfologia da encosta.

A maior classe de suscetibilidade é notada de forma mais expressiva no centro urbano do município, assim como em porções ao sul, na direção da PB-079, saída para Alagoa Grande, e ao norte, nas proximidades da PB-087, saída para Pilões. Percebe-se também que as altas declividades, principalmente ao sul, influenciaram significativamente. Também foram observadas a presença de classes críticas de uso e cobertura de solo, como a cultura de bananeiras, ao norte do município, associadas a inclinações do terreno próximo a 60%.

Corroborando com o resultado, no ano de 2022, devido às fortes chuvas, trechos das rodovias PB-079 e PB-087 ficaram obstruídos devidos aos movimentos de encostas que ocorreram em vários pontos dessas estradas, causando transtornos à população (G1 PB, 2022). A figura 32 mostra uma das cicatrizes dessas ocorrências.

Figura 32 – Movimento de massa próximo a estradas no município de Areia (PB)



Fonte: G1 PB (2022).

Dessa forma, considera-se as áreas classificadas como “alta” e “muito alta” suscetibilidade impróprias à ocupação humana em razão, principalmente, da existência de fatores críticos que geram uma grande possibilidade de ocorrência de movimentos de massa. Tendo em vista que algumas áreas já estão ocupadas, como o centro do município, é importante e urgente o monitoramento por parte dos órgãos competentes com o objetivo de prevenir os prejuízos sociais, ambientais e materiais.

Como medidas de intervenção é possível citar a realocação das famílias para locais seguros, reflorestamento da área, criação de Áreas de Proteção Ambiental (APAs), obras de retaludamento e contenção e obras de drenagem pluvial. Para além das medidas estruturais, pode-se citar também a fiscalização da aplicação das leis ambientais vigentes e leis de uso e ocupação do solo, bem como campanhas de educação ambiental.

5.6 Mapa de suscetibilidade da área urbana

Com vistas melhorar o nível de detalhe dos resultados obtidos, especialmente em uma área já povoada, a análise foi refeita para um recorte da área urbana, de acordo com os mesmos procedimentos apresentados anteriormente. Os pesos dos critérios provenientes do método AHP, já calculados no item 5.4, foram mantidos. Apenas os pesos dos subcritérios foram recalculados a partir de uma tabulação cruzada, entre os pontos de movimentos de massa mapeados e cada uma das classes dos mapas temáticos, analisando a frequência dos movimentos de massa. O resultado desta análise é mostrado na tabela 11.

Tabela 11 – Frequência dos movimentos de massa nas classes dos critérios

INDICADORES	CLASSES		FREQUÊNCIA DOS EVENTOS (%)
ALTITUDE	CLASSE 1	1 – 463 a 495 m	0
	CLASSE 2	2 – 495 a 527 m	4,17
	CLASSE 3	3 – 527 a 560	41,67
	CLASSE 4	4 – 560 a 592	29,17
	CLASSE 5	5 – Acima de 592m	25
DECLIVIDADE	CLASSE 1	1 – Plano (0 a 3%)	0
	CLASSE 2	2 – Suave Ondulado (3 a 8%)	4,17
	CLASSE 3	3 – Ondulado (8 a 20%)	16,67
	CLASSE 4	4 – Fortemente ondulado (20 a 45%)	62,5
	CLASSE 5	5 – Montanhoso (45 a 75%)	16,67
	CLASSE 6	6 – Escarpado (Acima de 75%)	0
GEOLOGIA	CLASSE 1	1 – São Caetano	66,67
	CLASSE 2	2 – Itaporanga	33,33
	CLASSE 3	3 – Serra dos Martins	0
PLANTA	CLASSE 1	1 – Convergente	54,17
	CLASSE 2	2 – Planar	12,5
	CLASSE 3	3 – Divergente	33,33
PERFIL	CLASSE 1	1 – Côncava	25
	CLASSE 2	2 – Retilínea	25
	CLASSE 3	3 – Convexa	50
USO E COBERTURA DO SOLO	CLASSE 1	1 – Vegetação Florestal	0
	CLASSE 2	2 – Vegetação Arbustiva	4,17
	CLASSE 3	3 – Cultura Banana	0

	CLASSE 4	4 – Cultura Cana	0
	CLASSE 5	5 – Pastagem	62,5
	CLASSE 6	6 – Solo Exposto	0
	CLASSE 7	7 – Área urbanizada	33,33
DRENAGEM	CLASSE 1	1 – Até 30m	0
	CLASSE 2	2 – 30 a 60m	0
	CLASSE 3	3 – 60 a 120m	0
	CLASSE 4	4 – 120 a 240m	29,167
	CLASSE 5	5 – Acima de 240m	70,833
ESTRADAS	CLASSE 1	1 – Até 30m	95,833
	CLASSE 2	2 – 30 a 60m	4,1667
	CLASSE 3	3 – 60 a 120m	0
	CLASSE 4	4 – 120 a 240m	0
	CLASSE 5	5 – Acima de 240m	0

Fonte: Autora (2023).

Observa-se que, nem sempre as classes mais críticas apresentam as maiores frequências dos eventos. Tal fato ocorre com as classes de maior declividade, unidade geológica da Serra dos Martins, curvatura côncava e proximidade dos rios, cuja potencialidade dos movimentos é considerada alta, como discutidos nos tópicos anteriores. Acredita-se que este resultado reitera a insuficiência de uma avaliação isolada de cada critério, dado o fato de que os movimentos de massa decorrem da interação de diversos fatores, e que uma mesma classe de critério pode apresentar diferentes graus de resistência aos processos de movimentos de massa, a depender das características do meio em que está inserido.

Além disso, vale ressaltar, que os dados de inventário não são oficiais e que não representam a totalidade dos locais de instabilização da área em estudo, mas sim locais conhecidos como pontos críticos. No entanto, o uso desse inventário, ainda que limitado, é importante para compreender os mecanismos de ocorrência das instabilizações de encostas e identificar áreas com características análogas, para que seja possível propor soluções no sentido de prevenir maiores catástrofes.

Assim, para transformar os planos de informação em uma escala padrão de mensuração, foi realizado a normalização dos dados da tabela 11 atribuindo pesos aos subcritérios dentro do intervalo de 1 a 5, e os resultados estão apresentados na tabela 12.

Tabela 12 – Pesos atribuídos aos sub-critérios.

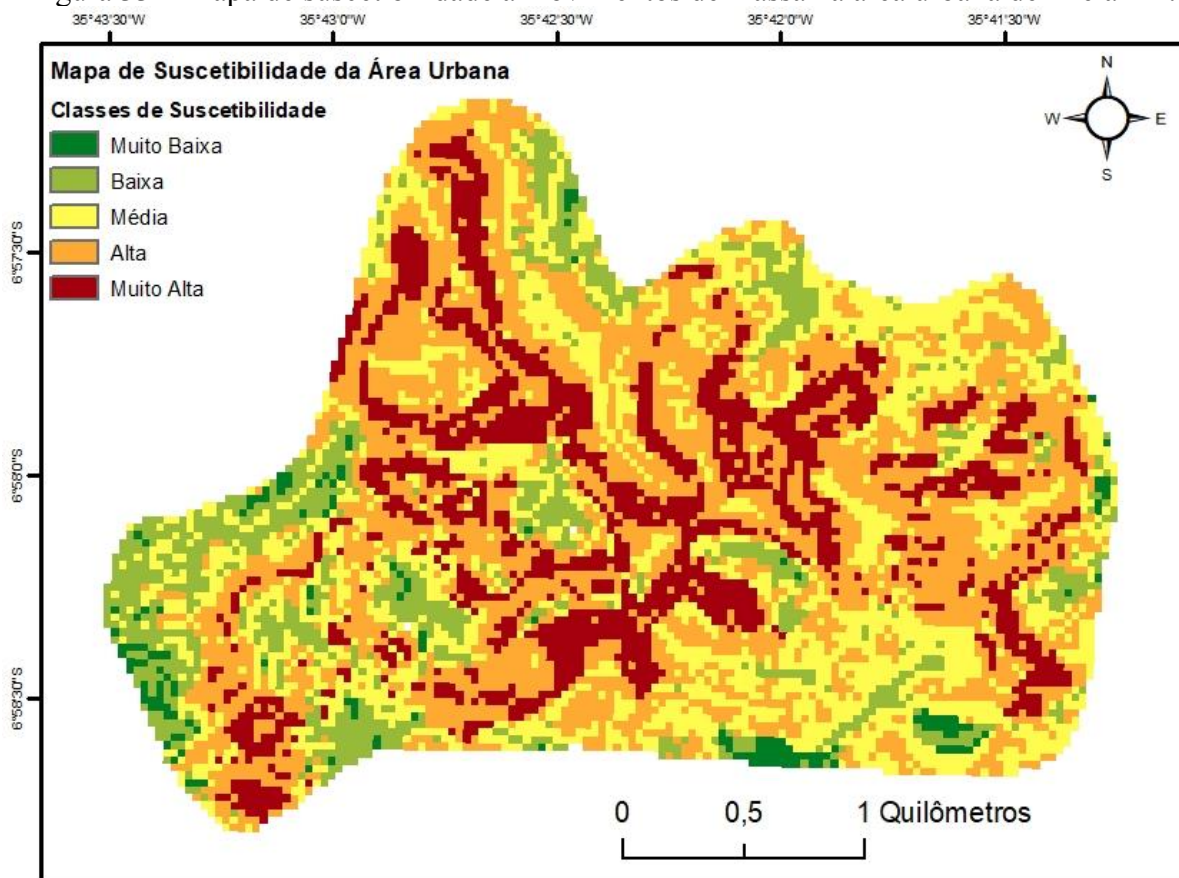
INDICADORES	PESOS (%)	CLASSES	NOTAS
Uso e cobertura do solo	26,5	1 – Vegetação Florestal	1
		2 – Vegetação Arbustiva	2
		3 – Cultura Banana	1
		4 – Cultura Cana	1
		5 – Pastagem	5

		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: Autora (2023).

Posteriormente à atribuição das notas e pesos referentes a cada plano de informação e utilizando procedimento de sobreposição de mapas já explicitado anteriormente, foi gerado o mapa de suscetibilidade da área urbana do município de Areia (PB), o qual foi agrupado em 5 classes: Muito baixa, Baixa, Média, Alta e Muito Alta. A Figura 33 apresenta este resultado.

Figura 33 – Mapa de suscetibilidade a movimentos de massa na área urbana de Areia-PB.



Fonte: Autora (2023).

Notadamente, pouquíssimas áreas correspondem a classes de “baixa” suscetibilidade, como já era esperado, estando localizada nas porções urbanas com altitudes inferiores a 527m, inclinações de até 20%, morfologia em perfil predominantemente retilínea, presença de pastagem e vegetação florestal, além de consideravelmente distante de rios e estradas. A suscetibilidade baixa não significa, necessariamente, que os processos analisados não poderão se desenvolver, pois atividades humanas podem alterar as condições do meio e deflagrar ou acelerar processos de instabilização (IPT, 2019).

Do contrário, as áreas cujo grau de suscetibilidade foi identificado como “alta” e “muito alta” localizam nas regiões cuja declividade ultrapassa 20%, podendo chegar a vertentes com 43%, predominam curvaturas convergente-côncavas, e são áreas já ocupadas e com alta densidade de estradas.

Como vantagem da utilização do mapa da figura 33 em comparação com o mapa da figura 31 pode-se citar o maior nível de detalhe na área urbana, região já ocupada pela população e suas construções, podendo direcionar melhor as ações urgentes de intervenção por parte dos órgãos governamentais.

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 e consistência ao modelo apresentado.

Percebe-se, ao centro do mapa, que as encostas que cercam o Balneário “O Quebra” estão nas classes de “Muito Alta” suscetibilidade. O lugar é reconhecido pelo seu valor histórico, cultural e turístico, assim como ponto crítico do município em se tratando de movimentos de massa. Além das inclinações que ultrapassam 60%, uma urbanização agressiva e formato côncavo ao pé do talude, problemas de degradação ambiental e o descarte de resíduos residenciais e águas servidas tem favorecido a deflagração das instabilizações dessas encostas.

O episódio de movimento de massa citado por Costa (2012) é localizado na encosta oeste do Quebra, que também é uma das áreas de risco identificadas pela CPRM. Neste local, as casas estão dispostas no topo de um talude de grande amplitude, com inclinações elevadas e variadas, naturalmente predisposto a processo de instabilização. As encostas do “Quebra” têm histórico de um grande movimento de massa que soterrou uma casa de banhos, e apresenta um processo erosivo severo, que pode se transformar em voçoroca (CPRM, 2015a).

Como citado anteriormente, Lira (2022) realizou estudos em uma das quatro áreas de risco identificadas pela CPRM, que constatou a tendência a falha do talude no estado não saturado, pois a instabilidade é induzida apenas pela infiltração da chuva que gera poropressões positivas ao longo da superfície do local. A análise de estabilidade determinística obteve fator de segurança (FS) abaixo de 1, indicando que a encosta é instável. O formato côncavo-convergente do talude contribui para a diminuição da sucção e favorecem o cisalhamento do solo, pois tende a concentrar e acumular o escoamento superficial.

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, estão localizados na classe Muito Alta (58,333%), onde, contabilizando com a classe Alta, somam aproximadamente 92% do total. Estes resultados são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 – Ocorrências de movimentos de massa por classes de suscetibilidade.

Graus de Suscetibilidade	Área (%)	Ocorrências Mapeadas	%
Muito Baixa	0,2 %	-	-
Baixa	2,8 %	-	-
Média	33,9 %	2	8,333 %
Alta	54,6 %	8	33,333 %
Muito Alta	8,5 %	14	58,333 %
TOTAL	100%	24	100 %

Fonte: Autora (2023).

6. CONCLUSÃO

Esta pesquisa teve como foco o mapeamento de suscetibilidade de ocorrência de movimentos de massa no município de Areia (PB), por meio da aplicação da metodologia semiquantitativa, incorporando a Processo de Análise Hierárquica (AHP) ao Sistema de Informações Geográficas (SIG).

O mapa de suscetibilidade elaborado mostra os pontos críticos do município conforme os parâmetros de controle escolhidos e verificados *in loco*. Esta 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 bibliografias utilizadas. Mesma com a baixa disponibilidade de informações precisas e banco de dados oficiais, este estudo possibilita decisões necessárias para direcionar a correta gestão urbanística, priorizando intervenções de forma a reduzir o risco ambiental e evitar transtornos causados por episódios frequente de movimentação de encostas.

O mapeamento de suscetibilidade a movimentos de massa em Areia (PB) mostrou que 45,9% do município se encontra na classe de Média suscetibilidade. As áreas de baixa e muito baixa suscetibilidade compreendem 40,8% do território. Isso se dá pela existência das áreas vegetadas, com baixos valores de declividades e baixa densidade de estradas. Já as áreas de suscetibilidade mais críticas, compreendem 13,3% da área total, onde se encontra o centro urbano.

A partir da análise geomorfológica do município de Areia (PB) pode-se constatar a fragilidade natural da paisagem frente as ocorrências dos movimentos de massa. A topografia extremamente acidentada, associada a fatores antrópicos, resultam no aparecimento de áreas suscetíveis a processos de instabilização de solo. Como consequência dos processos adotados e a falta de planejamento de forma sustentável, essas áreas se encontram degradadas favorecendo o surgimento de riscos ambientais.

Cada um dos condicionantes influencia o processo de instabilização em diferentes intensidades. Por meio dos 24 pontos de movimentos de massa, obtidos através de informações da população, foi possível constatar que as áreas com alto potencial de escorregamento são controladas pelos fatores Estradas, Geologia, Cobertura e Declividade, cuja Cobertura foi

entendida como fator preponderante, levando em consideração o fato de que a localização dos pontos foi mais comum em áreas densamente urbanizadas, especialmente as áreas de crescimento urbano mais recente.

Ressalta-se a importância da 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 no próprio município. É importante entender, para além dos fatores que fazem parte do processo de instabilização, o grau de influência de cada um.

O modelo mostrou-se válido e coerente por meio das comparações com registros histórico e estudos anteriores realizados no município, especialmente, com os relatórios de reconhecimento de áreas risco promovidos pela CPRM, cujos trabalhos fornecem elementos de comprovada utilidade para o planejamento do território. Considera-se que os resultados alcançados nesta pesquisa podem ser adicionados aos dados atuais do CPRM.

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 consistentes e capazes de fornecer melhores previsões sobre as distribuições espaciais das ocorrências de movimentos de massa na área de estudo.

Um mapa de suscetibilidade a movimentos de massa exige constante monitoramento, adaptação, correção e evolução. Como recomendações para trabalhos futuros, propõe-se:

- Atualização e documentação do inventário de movimentos de massa;
- Elaboração de obras de contenção para as encostas das áreas mais suscetíveis;
- Estudo geológico-geotécnico das áreas consideradas instáveis;
- Estudo de correlações entre classes dos mapas temáticos do meio físico com dados pluviométricos;
- Aplicação da metodologia AHP-SIG para cidades vizinhas com ocorrências de movimentos de massa.

REFERÊNCIAS

ABAY, Asmelash; BARBIERI, Giulio; WOLDEAREGAY, Kifle. 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). <http://dx.doi.org/10.4314/mejs.v11i1.2>.

ACHOUR, Yacine; POURGHASEMI, Hamid Reza. How do machine learning techniques help in increasing accuracy of landslide susceptibility maps? **Geoscience Frontiers**, Beijing, v. 11, n. 3, p. 871-883, maio 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gsf.2019.10.001>.

AESA. **Meteorologia – chuvas – gráfico**. Município: Areia. 2023. Disponível em: http://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: <http://geoserver.aesa.pb.gov.br/geoprocessamento/geoportais/shapes.html>. Acesso em: abril, 2023.

ANDRADE, Leonaldo Alves de; MACHADO, Célia C. Clemente; PEREIRA, Felipy Rafael M. (org.). **CARACTERIZAÇÃO DO USO E COBERTURA DA TERRA NO MUNICÍPIO DE AREIA-PB**. Areia: 2018.

AUGUSTO FILHO, O.; CERRI, L. E. S.; AMENOMORI, C. J. **Riscos Geológicos: Aspectos Conceituais**. In: Simpósio Latino-Americano Sobre Risco Geológico Urbano, 1, São Paulo, 1990. Anais... São Paulo: ABGE, 1990, p. 334-341.

BAHRAMI, Yousef; HASSANI, Hossein; MAGHSOUDI, Abbas. Landslide susceptibility mapping using AHP and fuzzy methods in the Gilan province, Iran. **GeoJournal**, Tehran, v. 86, n. 4, p. 1797-1816, 18 fev. 2020. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10708-020-10162-y>.

BATISTA, Lucas de Sousa. **Teoria da Decisão: Processo Analítico Hierárquico**. Belo Horizonte, 2019. 44 slides, color. Disponível em: <http://www.cpdee.ufmg.br/~lusoba/disciplinas/ele088/slides/08-ahp.pdf>. Acesso em: 01 fev. 2023.

BASTOS, F. H.; PEULVAST, J. P.. Suscetibilidade à Ocorrência de Movimentos de Massa no Maciço de Baturité- Ceará, Brasil. **Revista do Departamento de Geografia**, Fortaleza, v.32, 2016.

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)-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; <http://doi:10.3390/su12229601>

BIÇER, Çiğdem Tetik; ERCANOGLU, Murat. A semi-quantitative landslide risk assessment of central Kahramanmaraş City in the Eastern Mediterranean region of Turkey. *Arabian Journal Of Geosciences*, [S.L.], v. 13, n. 15, p. 1-26, 25 jul. 2020. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s12517-020-05697-w>.

BRASIL. Ministério das Cidades / Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT. **Mapeamento de Riscos em Encostas e Margem de Rios** / Celso Santos Carvalho, Eduardo Soares de Macedo e Agostinho Tadashi Ogura, organizadores – Brasília: Ministério das Cidades; Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, 2007. 176 p.

BRASIL. **Lei nº 12.608**, de 10 de abril de 2012. Institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil – PNPDEC; e dá outras providências. Brasília: 2012. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2011-2014/2012/lei/112608.htm. Acesso em: janeiro, 2022.

CERRI, L.E.S. **Riscos geológicos associados a escorregamentos: uma proposta para a prevenção de acidentes**. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.1993, 197 p.

CERRI, L. E. da S.; AMARAL, C. P. do. Riscos geológicos. In: OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A. **Geologia de engenharia**. São Paulo: ABGE, 1998. p. 301-310.

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>.

CNM - Confederação Nacional de Municípios. **Danos e prejuízos causados por desastres no Brasil entre 2013 a 2022**. Estudos Técnicos/Defesa Civil. Brasília/DF. Abril de 2022.

COROMINAS, J. et al. Recommendations for the quantitative analysis of Landslide risk. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, v. 73, n. 2, p. 209-263, 2014.

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 – Companhia de Pesquisa de Recursos Mineral. **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: 2015a. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/19743>. Acesso em: setembro, 2022.

CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Mineral. **Geologia e recursos minerais da Folha Campina Grande**, estados da Paraíba e Pernambuco: texto explicativo. Sérgio Willian de Oliveira Rodrigues e Vladimir Cruz de Medeiros (Org.) Recife: CPRM-RE, 2015b.

CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais/Serviço Geológico do Brasil. **Geologia da Folha de Solânea - SB.25-Y-A-IV**, escala 1:100.000: nota explicativa - Paraíba: UFPE /CPRM, 2007. 64p; 01 mapa geológico (Série Programa de Geologia do Brasil – PGB).

CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Mineral. **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.

CRUDEN, D. M. (1991). A Simple Definition of a Landslide. **Bulletin of the International Association of Engineering Geology**, 43, 27-29. <https://doi.org/10.1007/BF02590167>

DOU J, Tien Bui D, P. Yunus A, Jia K, Song X, Revhaug I, et al. (2015) Otimização de fatores causais para avaliação de suscetibilidade a deslizamentos de terra usando sensoriamento remoto e dados GIS em partes de Niigata, Japão. **PLoS UM** 10(7): e0133262. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0133262>

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. 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.

ESRI. Función de curvatura. 2019. Disponível em: <<https://pro.arcgis.com/es/pro-app/help/data/imagery/curvature-function.htm>>. Acesso em: 12 dez. 2022.

FAN, Wen; WEI, Xin-Sheng; CAO, Yan-Bo; ZHENG, Bin. Landslide susceptibility assessment using the certainty factor and analytic hierarchy process. **Journal Of Mountain Science**, [S.L.], v. 14, n. 5, p. 906-925, maio 2017. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11629-016-4068-2>.

FARIA, Daniela Girio Marchiori. **Mapeamento de perigo de escorregamentos em áreas urbanas precárias brasileiras com a incorporação do Processo de Análise Hierárquica (AHP)**. São Carlos, 2011. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação e Área de concentração em Geotecnia – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

FARIA, Daniela Gírio Marchiori; AUGUSTO FILHO, Oswaldo. Aplicação do Processo de Análise Hierárquica (AHP) no mapeamento de perigo de escorregamentos em áreas urbanas. **Revista do Instituto Geológico**, São Paulo, v. 34, n. 1, p. 23-44, out. 2013. Instituto Geologico. <http://dx.doi.org/10.5935/0100-929x.20130002>.

FLORENZANO, Teresa. **Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. E-book. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em: 01 jun. 2023.

GERSCOVICH, Denise M. S. **Estabilidade de taludes**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2016

GOMES, Kesia Guedes Arraes. **Um método multicritério para localização de unidades celulares de intendência da FAB**. 2009. v., 150 f. : il.; Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia de Produção.

G1 PB (Brasil). Deslizamentos acontecem em vias de Areia, PB, após acúmulo de chuvas. 2022. Disponível em: <https://g1.globo.com/pb/paraiba/noticia/2022/07/07/deslizamentos-acontecem-em-vias-de-areia-pb-apos-acumulo-de-chuvas.ghtml>. Acesso em: 23 maio 2023.

HENRIQUE, Hugo Manoel. **Mapa de Risco a deslizamento e erosão do bairro de Rurópolis, município do Ipojuca-PE**. Recife: O Autor, 2014. 160 folhas, il., gráfs., tabs. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2014.

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.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (Brasil). **Pedologia (Areia, PB)**. BDIA - Banco de Informações Ambientais. Disponível em: <https://bdiaweb.ibge.gov.br/#/consulta/pedologia>. Acesso em: 19 dez. 2022.

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). **Manual Técnico da Vegetação Brasileira**. Série Manuais Técnicos em Geociências 1, 2ª edição, revista e ampliada. Rio de Janeiro. 2012. 275 p.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (Brasil). **Malha de setores censitários**. Disponível em: [https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html?caminho=organizacao_do_territorio/malhas_territoriais/malhas_de_setores_censitarios_divisoes_intramunicipais/2021/Malha_de_setores_\(kmz\)_por_municipios](https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html?caminho=organizacao_do_territorio/malhas_territoriais/malhas_de_setores_censitarios_divisoes_intramunicipais/2021/Malha_de_setores_(kmz)_por_municipios). Acesso em: out, 2022.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (Brasil). **Suscetibilidade a deslizamentos do Brasil: primeira aproximação**. Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. Rio de Janeiro: IBGE, 2019. 56p.: il.

IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas. **Cartas de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundações: 1:25.000**: nota técnica explicativa. São Paulo: IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo; Brasília, DF : CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 2014. – (Publicação IPT ; 3016) 5 Mb ; PDF

KAMP, Ulrich; GROWLEY, Benjamin J.; KHATTAK, Ghazanfar A.; OWEN, Lewis A.. GIS-based landslide susceptibility mapping for the 2005 Kashmir earthquake region. **Geomorphology**, [S.L.], v. 101, n. 4, p. 631-642, nov. 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.03.003>.

KRISTANTO, Wisnu Aji Dwi; KUSUMAYUDHA, Sari Bahagiarti; PURWANTO, Heru Sigit; NUGROHO, Nandra Eko; KHAFID, Mohammad Abdul. 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 Publishing. <http://dx.doi.org/10.1063/5.0010170>.

LIRA, Bruna Silveira. **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>

LIU, Jie; DUAN, Zhao. Quantitative Assessment of Landslide Susceptibility Comparing Statistical Index, Index of Entropy, and Weights of Evidence in the Shangnan Area, China. **Entropy**, [S.L.], v. 20, n. 11, p. 868, 10 nov. 2018. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/e20110868>.

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: <http://doi.org/10.6008/SPC2318-2881.2017.002.0003>

MEIRELLES, Evelyn de Oliveira; DOURADO, Francisco; COSTA, Vivian Castilho da. Análise Multicritério para Mapeamento da Suscetibilidade a Movimentos de Massa na Bacia do Rio Paquequer- RJ. **Geo Uerj**, [S.L.], n. 33, p. 1-22, 31 dez. 2018. Universidade de Estado do Rio de Janeiro. <http://dx.doi.org/10.12957/geouerj.2018.26037>.

MEZUGHI, Tareq 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**, [S.L.], v. 5, n. 1, p. 13-24, 15 dez. 2011. Science Alert. <http://dx.doi.org/10.3923/ajes.2012.13.24>.

MOKARRAM, Marzieh; ZAREI, Abdol Rassoul. Landslide Susceptibility Mapping Using Fuzzy-AHP. **Geotechnical And Geological Engineering**, [S.L.], v. 36, n. 6, p. 3931-3943, 28 maio 2018. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10706-018-0583-y>.

MOREIRA, Fernando Diniz; MORAES, Carla Gisele M. Santos Martins. O desenvolvimento urbano de Areia/PB: contribuição aos estudos de morfologia e história urbana no Brasil. **Revista de Pesquisa em Arquitetura e Urbanismo**, São Paulo, v. 9, n. 1, p. 133-225, jan. 2009.

NASCIMENTO, Ricardo Ribeiro do; MARQUES, Eduardo Antonio Gomes; SIMÕES, Gustavo Ferreira. 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. <http://dx.doi.org/10.1007/s11069-022-05730-z>.

PARK, Soyoun; CHOI, Chuluong; KIM, Byungwoo; KIM, Jinsoo. Landslide susceptibility mapping using frequency ratio, analytic hierarchy process, logistic regression, and artificial neural network methods at the Inje area, Korea. *Environmental Earth Sciences*, [S.L.], v. 68, n. 5, p. 1443-1464, 9 ago. 2012. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s12665-012-1842-5>.

POKHREL, K., & BHANDARI, B. P. (2019). Identification of Potential Landslide Susceptible Area in the Lesser Himalayan Terrain of Nepal. **Journal of Geoscience and Environment Protection**, 7, 24-38. <https://doi.org/10.4236/gep.2019.711003>

PRADHAN, A.M.s.; KIM, Y.T.. Evaluation of a combined spatial multi-criteria evaluation model and deterministic model for landslide susceptibility mapping. **Catena**, [S.L.], v. 140, p. 125-139, maio 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2016.01.022>.

RIFFEL, Eduardo Samuel. **Metodologias para mapeamento de suscetibilidade a movimentos de massa**. 2017. 125 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Porto Alegre, BR-RS, 2017.

SAADATKHAH, Nader; KASSIM, Azman; LEE, Lee Min. Susceptibility Assessment of Shallow Landslides in Hulu Kelang Area, Kuala Lumpur, Malaysia Using Analytical Hierarchy Process and Frequency Ratio. **Geotechnical And Geological Engineering**, [S.L.], v. 33, n. 1, p. 43-57, 11 nov. 2014. Springer Science and Business Media LLC. <http://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. [http://dx.doi.org/10.1016/0270-0255\(87\)90473-8](http://dx.doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8).

SAATY, T.L. 1980. **The Analytic Hierarchy Process**. McGraw Hill, New York.

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. <http://dx.doi.org/10.1504/ijssci.2008.017590>.

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. [http://dx.doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90057-i](http://dx.doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057-i).

SAATY, T.L. **Fundamentals of Decision Making and Priority Theory with the Analytic Hierarchy Process**. V.6. New York, RSW Publication, 1994.

SAITO, S. M.; SORIANO, E.; LONDE, L. de R. Desastres Naturais. In: SAUSEN, Tania Maria; LACRUZ, María Silvia Pardi. (Org.) **Sensoriamento remoto para desastres**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. E-book. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em: 31 jan. 2023.

SANTOS, E. J. **O plúton 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.

SANTOS, José Nailson Barros et al. Uso e ocupação do solo de Areia-PB em cenário de exploração do Brejo de Altitude. **Agropecuária Científica no Semiárido**, Patos, v. 14, n. 4, p. 1-6, dez. 2018.

SHANO, Leulalem; RAGHUVANSHI, Tarun Kumar; METEN, Matebie. Landslide susceptibility evaluation and hazard zonation techniques – a review. **Geoenvironmental Disasters**, [S.L.], v. 7, n. 1, p. 1-19, 20 maio 2020. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1186/s40677-020-00152-0>.

SILVA NETO, J. C. A. (2013) Avaliação da vulnerabilidade à perda de solos na bacia do rio Salobra, MS, com base nas formas do terreno. **Geografia**, 22(1):5-25.

SOUSA, Maria Natália de Melo. **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.

TAQUEZ, David Esteban Diaz. **Susceptibilidade a ocorrências de movimentos de massa e avaliação da estabilidade de falésias sob condição não saturada**: estudo de caso no centro de lançamento da barreira do inferno – Brasil. 2017. 216 f.: il. Dissertação (Mestrado) – Universidade do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa e Pós-Graduação em Engenharia Civil. Natal, RN. 2017.

TOMINAGA, L. K.; Desastres Naturais: por que ocorrem? In: Tominaga, Lúcia Keiko; Santoro, Jair; Amaral, Rosângela do (Organizadores) **Desastres Naturais**: conhecer para prevenir. 1. ed. São Paulo: Instituto Geológico, 2009a.

TOMINAGA, L. K.; Escorregamentos. In: Tominaga, Lúcia Keiko; Santoro, Jair; Amaral, Rosângela do (Organizadores) **Desastres Naturais**: conhecer para prevenir. 1. ed. São Paulo: Instituto Geológico, 2009b.

UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina. Centro Universitário de Pesquisa e Estudos sobre Desastres. **Capacitação básica em Defesa Civil** / [Textos: Janaína Furtado; Marcos de Oliveira; Maria Cristina Dantas; Pedro Paulo Souza; Regina Panceri. - 4. edição - Florianópolis: CAD UFSC, 2013. 122 p.: 30 cm.

VALERIANO, M. M. Dados topográficos. In: FLORENZANO, T. G. (Org.). **Geomorfologia**: conceitos e tecnologias atuais. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. p. 74-103.

VARANDA, Érica. **Mapeamento Quantitativo de Risco de Escorregamentos para o 1º Distrito de Petrópolis/RJ utilizando análise em Sistema de Informações Geográficas** [Rio de Janeiro] 2006 XVI, 137p 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Civil. 2006) Dissertação – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE

VARNES, David J. Slope Movement: Types and Processes. In: Robert L. Schuster, Raymond I. Krizek (ed.) **LANDSLIDES**: Analysis and Control. Special Report. Washington D.C.: National Academy Of Sciences, 1978.

YALCIN, Ali. GIS-based landslide susceptibility mapping using analytical hierarchy process and bivariate statistics in Ardesen (Turkey): comparisons of results and confirmations. **Catena**, [S.L.], v. 72, n. 1, p. 1-12, jan. 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2007.01.003>.

ZHANG, Guifang 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. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2016.03.028>.

ZHANG, Wengang et al. Landslide Susceptibility Research Combining Qualitative Analysis and Quantitative Evaluation: a case study of yunyang county in chongqing, China. **Forests**, Basel, v. 13, n. 7, p. 1055-1075, 4 jul. 2022. <http://dx.doi.org/10.3390/f13071055>.

ANEXOS

Matriz dos Julgamentos paritários

	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

Matriz Normalizada

	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