UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
CENTRO DE CIÊNCIAS DO AMBIENTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS DO AMBIENTE E SUSTENTABILIDADE NA AMAZÔNIA
MESTRADO ACADÊMICO

BRUNO GABRIEL SANTOS CORREA

ANÁLISE DA VULNERABILIDADE A DESLIZAMENTOS NO ESPAÇO URBANO DE MANAUS

Manaus / AM
2024

BRUNO GABRIEL SANTOS CORREA

ANÁLISE DA VULNERABILIDADE A DESLIZAMENTOS NO ESPAÇO URBANO DE MANAUS

Orientador: Prof. Dr. Henrique dos Santos Pereira

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Ciências do Ambiente e Sustentabilidade na Amazônia como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciências do Ambiente da Universidade Federal do Amazonas.

Manaus / AM
2024

Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Corrêa, Bruno Gabriel Santos
C824a Análise da vulnerabilidade a deslizamentos no espaço urbano de Manaus / Bruno Gabriel Santos Corrêa . 2024
96 f.: il. color; 31 cm.

Orientador: Henrique dos Santos Pereira
Dissertação (Mestrado em Ciências do Ambiente e Sustentabilidade na Amazônia) - Universidade Federal do Amazonas.

1. Climatologia. 2. Deslizamento. 3. Mapeamento. 4. Vulnerabilidade. I. Pereira, Henrique dos Santos. II. Universidade Federal do Amazonas III. Título

BRUNO GABRIEL SANTOS CORREA

ANÁLISE DA VULNERABILIDADE A DESLIZAMENTOS NO ESPAÇO URBANO DE MANAUS

A dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Ciências do Ambiente e Sustentabilidade na Amazônia, como um dos requisitos para obtenção dotítulo de Mestre em Ciências do Ambiente e Sustentabilidade na Amazônia, na área de concentração de Dinâmicas Socioambientais.

Aprovado em 11 de setembro de 2024.

BANCA EXAMINADORA

_____

Profa. Dra. Jussara Socorro Cury Maciel
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas – IFAM

_____

Profa. Dra. Luana Lisboa
Serviço Geológico do Brasil - SGB

_____

Profa. Dra. Suzy Cristina Pedrosa da Silva
Universidade Federal do Amazonas – UFAM

AGRADECIMENTOS

A jornada no âmbito da pesquisa é uma caminhada continua que muitas vezes é introduzida desde as primeiras atividades educacionais como a leitura e a escrita, por meio dessa importância venho agradecer às minhas tias, Flávia Corrêa e Dayana Corrêa que sempre com Gladys Corrêa impulsionaram meu desenvolvimento intelectual. Partindo do conhecimento compartilhado por elas, sempre almejei contribuir e me dedicar na formação de um mundo melhor para a sociedade.

Ao longo das etapas de ensino na formação de engenheiro civil, a orientação da Dra. Jussara Socorro Cury Maciel inspirou o início da carreira científica de pesquisa que resultou em muitos trabalhos acadêmicos. No desenvolvimento desses trabalhos, o uso do geoprocessamento é uma ferramenta bastante abordada. Aldenir Justino de Oliveira apresentou essa técnica durante seu estágio no Serviço Geológico do Brasil – SGB, onde transmitiu seu conhecimento e paixão pela criação de mapas. Contudo, nesse período, o estágio no SGB foi um universo de conhecimento que colaborou para o desenvolvimento da produção na dissertação no mestrado. Por meio disso, sou grato à equipe da Hidrologia da GEHITE-MA e à Dra. Luana Lisboa. Da mesma forma, a contribuição de pesquisadores como Aline Venâncio de Moura, Phaulla Oliveira, M.Sc. Aixa Lopes e Victor Neves, que auxiliaram na tabulação e no georreferenciamento de sondagens a percussão e das ocorrências de deslizamento.

Portanto, a contribuição dos órgãos da Defesa Civil Municipal de Manaus, Serviço Geológico do Brasil e Universidade Federal do Amazonas são fundamentais para a formulação do produto resultante desse estudo. Assim como os drs. Henrique Pereira, Suzy Silva e Raphael Di Carlo, que disponibilizaram observações e contribuições para melhor elaboração no desenvolvimento técnico da pesquisa. Desse modo, venho agradecer a esta rede de apoio de Pesquisadores e Instituições que me disponibilizaram um enriquecimento técnico para elaboração desta dissertação.

RESUMO

O clima global atualmente apresenta modificações significativas nos seus ciclos, com a intensificação de ocorrências de desastres naturais como deslizamentos, enchentes e secas extremas, dentre outros. De acordo com levantamento do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais – CEAMADEN, no Brasil, a ocorrência desses fenômenos, em 2023, alcançou o registro de 1.161 casos, sendo que no ranking de municípios afetados, Manaus esteve em primeiro lugar, com 23 ocorrências. A cidade de Manaus está localizada em uma região tropical onde a alta incidência de precipitação é um dos fatores climatológicos relevantes nas respostas ambientais da região. Assim sendo, os principais eventos de desastres no município estão relacionados às inundações, alagamentos e deslizamentos. Com base nessa situação específica, o objetivo do estudo foi compreender a dinâmica dos eventos de deslizamentos urbanos, utilizando dados coletados durante os últimos 20 anos pela Defesa Civil Municipal de Manaus, visando relacionar as ocorrências a uma série de características socioambientais, visando compreender os padrões de variabilidade espacial associados a esse tipo de desastre natural. Para se chegar a uma interpretação espacial dos fenômenos de deslizamentos, utilizaram-se técnicas de geoprocessamento. Para isso, os registros de ocorrências de deslizamentos foram relacionados a um conjunto de variáveis especializadas formado TIF de dados com nível do aquífero subterrâneo, a declividade do relevo, o uso e ocupação do espaço urbano, a malha demográfica de acordo com Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, a pluviometria com dados do Instituto Nacional de Meteorologia - INMET, Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais - CEMADEN e do Serviço Geológico do Brasil - SBG. Além dessas informações, também foram caracterizados os parâmetros do solo urbano de Manaus obtidos pelo Serviço Geológico do Brasil, que possui informações dos laudos de resistência à penetração do amostrador (NSPT) das empresas de sondagem. As informações, que são provenientes de análises pontuais, foram criadas com o recurso da krigagem, o que permitiu a cobertura de dados para a área em questão. A modelagem foi baseada na análise hierárquica AHP, que relaciona os fatores em um estudo e estabelece valores de pesos nos critérios para cada parâmetro. As variáveis analisadas foram ponderadas seguindo essa sistemática para elaboração da espacialização das zonas de vulnerabilidade em Manaus. O produto dessa investigação é uma matriz de vulnerabilidade socioambiental validada pelos registros de ocorrência, mapas contendo a geolocalização dos registros e sua correlação com a precipitação e características locais. Assim, o modelo criado a partir da validação dos registros visa caracterizar as áreas vulneráveis por meio da precipitação. Logo, o conjunto dessa modelagem em relação à precipitação fornece probabilidades do risco e instrui a delimitadas zonas da cidade que venham orientar aos órgãos públicos mecanismos de resiliência ao impacto do fenômeno na sociedade.

Palavras-Chave: Climatologia, Deslizamento, Mapeamento e Vulnerabilidade.

ABSTRACT

The global climate currently presents significant modifications in its cycles, with the intensification of occurrences of natural disasters such as landslides, floods and extreme droughts, among others. According to a survey by the National Center for Monitoring and Alerts of Natural Disasters (CEAMADEN), in Brazil, the occurrence of these phenomena, in 2023, reached the record of 1,161 cases, and in the ranking of affected municipalities, Manaus was in first place, with 23 occurrences. The city of Manaus is in a tropical region where the high incidence of precipitation is one of the relevant climatic factors in the environmental responses of the region. Thus, the main disaster events in the municipality are related to, flooding, flooding and landslides. Considering this local scenario, the study aimed to understand the dynamics of the phenomena of urban landslides based on the data of the records of the last 20 years, under the responsibility of the Municipal Civil Defense of Manaus, relating the occurrences to a set of socio-environmental characteristics aimed at generating an interpretation of the patterns of spatial variability of the dynamics of this type of natural disaster. To arrive at a spatial interpretation of the phenomenon of landslides, geoprocessing techniques were used. For this, the records of occurrences of landslides were related to a set of specialized variables formed by data with the level of the underground aquifer, the slope of the relief, the use and occupation of the urban space, the demographic mesh according to the Brazilian Institute of Geography and Statistics - IBGE, the pluviometry with data from the National Institute of Meteorology - INMET, the National Center for Monitoring and Warnings of Natural Disasters, and the Brazilian Geological Service - SBG. In addition to this information were also characterized the parameters of the urban soil of Manaus obtained by the Geological Service of Brazil which has information from the reports of resistance to penetration of the sampler (NSPT) of the soil survey companies. The information coming from point analyses, the data surfaces were generated with the resource of the kriging, in this way the coverage of information for the study area was obtained. The modeling was developed according to the hierarchical analysis AHP, which is a mathematical method related to the factors seen in a study and that sets up values of weights in the criteria for each parameter. The variables analyzed were weighted following this systematic to elaborate the spatialization of the zones of vulnerability in Manaus. The product of this investigation is a matrix of socioenvironmental vulnerability confirmed by occurrence records, maps holding the geolocation of the records and its correlation with precipitation and local characteristics. Thus, the model developed with the validation of the records provides through precipitation the characterization of the regions of vulnerabilities. Therefore, the set of this modeling in relation to precipitation provides probabilities of the risk and instructs the delimited zones of the city to guide the public bodies mechanisms of resilience to the impact of the phenomenon on society.

Keywords: Climatology, Landslide, Mapping and Vulnerability.

LISTA DE ILUSTRAÇÃO

Figura 1. Localização do perímetro urbano de Manaus. 18
Figura 2. Acumulado de precipitação horária de 2015 a 2019. 20
Figura 3. Localização das estações pluviométricas do CEMADEN em Manaus. 20
Figura 4. Rede de drenagem existente no perímetro urbano de Manaus. 21
Figura 5. Mapa da hidrografia urbana de Manaus.....22
Figura 6. Boletim de sondagem de solo. 25
Figura 7. Estação pluviométrica convencional. 25
Figura 8. Esquema dos equipamentos de sondagem SPT 35
Figura 9. Fluxograma da estrutura metodológica do geoprocessamento.....43
Figura 10. Estrutura geral de Sistemas de Informação Geográfica.....45
Figura 11. Ilustração do processo de interpolação: amostras e o grid para determinação da superfície em cada retângulo.....46
Figura 12. Etapas constituintes na Krigagem 49
Figura 13. Esquema de Variograma.....50
Figura 14. Matriz de análise multivariável AHP. 54
Figura 15. Mapa de registro de deslizamentos urbanos em Manaus no período de 2002 a 2022. 56
Figura 16. Mapa de registro de deslizamentos urbanos em Manaus no período de 2002 a 2004. 57
Figura 17. Mapa de registro de deslizamentos urbanos em Manaus no período de 2005 a 2008. 58
Figura 18. Mapa de registro de deslizamentos urbanos em Manaus no período de 2009 a 2012. 58
Figura 19. Mapa de registro de deslizamentos urbanos em Manaus no período de 2013 a 2016. 59
Figura 20. Mapa de registro de deslizamentos urbanos em Manaus no período de 2017 a 2020. 59
Figura 21. Mapa de registro de deslizamentos urbanos em Manaus no período de 2021 a 2022. 60
Figura 22. Registro de deslizamentos urbanos em Manaus no período de 2002 a 2022 61
Figura 23. Registro de deslizamentos urbanos em Manaus nas Zonas Administrativas no período de 2002 a 2022. 63
Figura 24. Mapa de pluviômetros de Manaus. 64
Figura 25. Precipitação mensal interanual da estação (8233) de 2002 a 2022. 65
Figura 26. Precipitação mensal interanual da estação (00359005) de 2002 a 2022. 66
Figura 27. Precipitação mensal interanual da estação (a0101) de 2002 a 2022. 66
Figura 28. Série mensal de deslizamentos e precipitação em Manaus. 67
Figura 29. Percentual trimestral de deslizamentos em Manaus no período de 2000 a 2022. 68
Figura 30. Relação da Precipitação Acumulada x Ocorrências de Deslizamentos em Manaus. 69

Figura 31. Mapa de espacialização de precipitação Acumulada de 7 dias em Manaus. 70
Figura 32. Relação da declividade com as ocorrências de deslizamento em Manaus. 70
Figura 33. Mapa de declividade da cidade de Manaus. 71
Figura 34. Mapa de fluxo de direção de escoamento hídrico de Manaus. 72
Figura 35. Mapa de uso e ocupação do solo de Manaus em 2022. 73
Figura 36. Mapa de densidade populacional de Manaus em 2022. 74
Figura 37. Mapa de espacialização do nível de água do aquífero no solo de Manaus. 75
Figura 38. Mapa de espacialização de sondagem a percussão do solo em Manaus. 75
Figura 39. Mapa de espacialização do peso específico do solo em Manaus. 75
Figura 40. Espacialização da coesão do solo de Manaus. 76
Figura 41. Espacialização estimada do ângulo de atrito do solo em Manaus. 76
Figura 42. Percentual trimestral de deslizamentos em Manaus. 77
Figura 43. Relação do índice de SPT e os deslizamentos em Manaus. 78
Figura 44. Relação do peso específico do solo com os registros de deslizamento em Manaus. 78
Figura 45. Relação da coesão do solo com as ocorrências de deslizamento em Manaus. 79
Figura 46. Relação do ângulo de atrito do solo com os deslizamentos em Manaus. 80
Figura 47. Percentual de contribuição dos parâmetros a deslizamento em Manaus 82
Figura 48. Mapa de risco de deslizamentos em Manaus. 83
Figura 49. Relação de ocorrências de deslizamentos nos grupos de riscos em Manaus. 84
Figura 50. Relação de números de deslizamentos com precipitações acumuladas em Manaus 85
Figura 51. Mapa de risco a deslizamento em precipitação acumulada de 10 milímetros em Manaus. 87
Figura 52. Risco a deslizamento em precipitação acumulada de 100 milímetros em Manaus. 88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Peso específico de solos argilosos.....38
Tabela 2. Peso específico de solos arenosos. 38
Tabela 3. Correlação dos parâmetros geotécnicos. 40
Tabela 4. Hierarquização dos valores de importância de uma variável no AHP. 53
Tabela 5. Índice Randômico Médio do AHP. 55
Tabela 6. Registro de deslizamentos urbanos em bairros de Manaus no período de 2002 a 2022. 62
Tabela 7. Registro de dados pluviométricos em Manaus no período de 2002 a 2022. 64
Tabela 8. Matriz ponderada de análise hierárquica dos parâmetros do estudo a deslizamento. 81
Tabela 9. Cálculos derivados da matriz da análise hierárquica sobre deslizamento em Manaus.....82
Tabela 10. Registro de dados pluviométricos em Manaus no período de 2002 a 2022. 86

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Caracterização dos dados observados no estudo relacionados com a relação de risco de desastres de Rebelo 2003. 23
Quadro 2. Descrição dos tipos de deslizamentos. 29
Quadro 3. Fatores causadores dos movimentos de massa. 31
Quadro 4. Tipos de sondagens. 33
Quadro 5. Apresentação das penetrações na sondagem a percussão. 36
Quadro 6. Vantagem e desvantagens do uso da Krigagem. 51
Quadro 7. Matriz de análise multivariável AHP. 54

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AHP	Processo Hierárquico Analítico
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
CEMADEN	Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
SGB	Serviço Geológico do Brasil
SPT	Sondagem a Percussão
SIG	Sistema de informação geográfica

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 15

2. OBJETIVOS 17

2.1. Objetivo Geral 17
2.2. Objetivo Específico 17

3. PROCEDIMETOS METODOLÓGICOS 18

3.1. Área de Estudo 18
3.2. Caracterização do Solo 19
3.3. Precipitação 19
3.4. Drenagem Urbana 21
3.5. Hidrografia 22
3.6. Método da Pesquisa 23
3.7. Coleta dos Dados 24
3.8. Análise e Tratamento dos Dados 26
3.9. Modelagem da Superfície do Terreno 26
3.10. Modelagem Estatística Espacial 26

CAPÍTULO I 28

1. MOVIMENTAÇÃO DE MASSA 28

1.1 Definição 28
1.1.1. Classificação dos Tipos de Movimentos de Massa 29
1.1.2. Fatores Relacionados a Movimentação de Massa 30

CAPÍTULO II 33

1. INVESTIGAÇÃO DE SUBSOLO 33

2.1. Sondagem a Percussão - Definição e Procedimentos 34
2.2. Correlação dos Parâmetros Geotécnicos 37
2.2.1. Métodos Indiretos 37
2.2.1.1. Peso Específico 38
2.2.1.2. Ângulo de Atrito 38
2.2.1.3. Coesão 39
2.2.2. Métodos Diretos 41

CAPÍTULO III 43

2. GEOPROCESSAMENTO 43

3.1. Sistema de Informação Geográfica SIG 44
3.2. Geoestatística 46
3.3. Krigagem 48
3.4. Método de Análise Hierárquica – AHP 52

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO 56

6.1. Caracterização dos Deslizamentos Urbanos de Manaus 56
6.2. Análise Pluviométrica Interanual de Manaus 63
6.3. Análise comparativa dos parâmetros x deslizamentos em Manaus 68

6.4. MAPA DE RISCO A DESLIZAMENTO EM MANAUS.....80
7. CONCLUSÃO 90
REFERÊNCIAS.....92

1. INTRODUÇÃO

O espaço urbano é marcado por uma diversidade de características naturais e antrópicas que interferem na dinâmica ambiental. Desse modo, existe uma variedade de fenômenos que ocasionam impactos nas populações residentes nas cidades. Partindo dessa premissa, há alguns desses fenômenos que podem ser denominados de desastres naturais e se apresentam na forma de inundações, alagamentos, deslizamentos, tempestades, erosão, estiagem e outros. Um desastre pode ser considerado como uma grave perturbação do funcionamento de uma comunidade ou de uma sociedade ao envolver perdas humanas, materiais, econômicas ou ambientais de grande extensão, afetando a capacidade dos indivíduos na utilização dos seus próprios recursos (UNISDR, 2013).

Nos últimos anos, a incidência desses fenômenos é evidenciada com maior recorrência. A causa dessa elevada frequência tem relação com a mudança do clima global, associada ao aquecimento global, que pode alterar a frequência, a intensidade, a distribuição espacial, a duração e o sincronismo dos eventos extremos, e resultar em condições excepcionais, até mesmo nunca observadas (IPCC, 2014). Segundo Goerl e Kobiyama (2005), alguns setores da sociedade e até pesquisadores mencionam, inclusive, um aumento na frequência de desastres naturais nas últimas décadas, com destaque para aqueles que estão relacionados à precipitação.

Na cidade de Manaus, os principais desastres naturais existentes são as inundações, as estiagens e os deslizamentos de terra. A expansão desses desastres ocorre pelo crescimento populacional e urbano de forma desorganizada na região, o que propicia os mecanismos para o surgimento dessas ocorrências. Partindo dessa condição, as zonas norte e leste da cidade de Manaus são as que apresentam maior número de pessoas que residem em áreas inadequadas e sem acesso aos serviços urbanos, devido ao crescimento acentuado nos últimos anos (Oliveira e Costa, 2007). Por outro lado, de acordo com Kousky (2012), a magnitude do impacto destes eventos depende da intensidade dos fenômenos meteorológicos, climáticos, geológicos e do desenvolvimento econômico da região, bem como, dos investimentos e articulações das políticas públicas utilizadas para a prevenção.

Dessa maneira, a análise conduzida neste estudo se propõe a compreender os fatores existentes em Manaus que possam ser associados ao fenômeno dos

deslizamentos de terra. Os deslizamentos respondem por grande parte dos riscos na região metropolitana de Manaus e em outras áreas (Costa, 2017). Ao analisar a ação do deslizamento, é necessário considerar uma combinação de fatores correspondentes às características físicas, sociais e políticas que, combinados, podem se estabelecer como condições de risco aos desastres ambientais (Narváez et al., 2009; De Almeida et al., 2016).

Logo, a importância do estudo desse fenômeno reside na sua contribuição fundamental para o embasamento técnico-científica do enfrentamento dos desastres naturais, pois há uma necessidade crescente no desenvolvimento de ferramentas de planejamento e de gestão territorial que sejam seguras e minimizem os riscos humanos e ambientais, como a perda de vidas, e danos materiais às propriedades, especialmente em áreas densamente povoadas (Sardinha et al., 2016). Assim, esta investigação técnica dos casos de deslizamentos em Manaus teve por base levantamentos bibliográficos e documentais e nos recursos dos dados disponibilizados pela Defesa Civil, Serviço Geológico do Brasil, INMET e outros. A relação dessas informações, que se dá por meio de dados específicos, requereu o uso da geoestatística para a espacialização de dados sobre a área urbana de Manaus. Portanto, os resultados das análises das camadas de informações elaboradas no estudo por meio de correlações e pesos determinados conforme o grau de relevância na análise do fenômeno vem auxiliar a construção de uma modelagem estatística e espacial que resulta em um sistema de alertas segundo o índice pluviométrico, por meio disso apresentando as regiões de vulnerabilidade no espaço urbano de Manaus.

2. OBJETIVOS

Este estudo, sobre deslizamentos no espaço urbano de Manaus, tem como contribuição à gestão urbana, propiciar as bases de dados e os conhecimentos que subsidiem o estabelecimento de mecanismos de prevenção, mitigação, preparação, resposta e recuperação de desastres naturais de deslizamento de terras, tornando por meio do geoprocessamento, a cidade mais resiliente a esse fenômeno natural.

2.1. Objetivo Geral

Desenvolver um modelo espacial que caracterize os graus de riscos de deslizamentos no espaço urbano de Manaus, a partir da caracterização de vulnerabilidade da região, e fomentar o uso dessa ferramenta no apoio ao planejamento de monitoramento dos desastres de deslizamentos pela Defesa Civil Municipal.

2.2. Objetivo Específico

Os objetivos específicos do estudo de deslizamento em Manaus foram, a saber:

- ✓ Compreender a caracterização climatológica local, como o sistema precipitante da região e as estações climáticas existentes nesse espaço, e verificar sua correlação com a manifestação dos deslizamentos de terra.
- ✓ Analisar as características geológicas do espaço do estudo e compreender seus aspectos de contribuição para o surgimento desse movimento de terras ocasionado no deslizamento e verificar as declividades existentes nesse espaço.
- ✓ Verificar as condições locais de maior vulnerabilidade da cidade e relacionar suas influências com ocorrência e prevalência dos deslizamentos de terra.

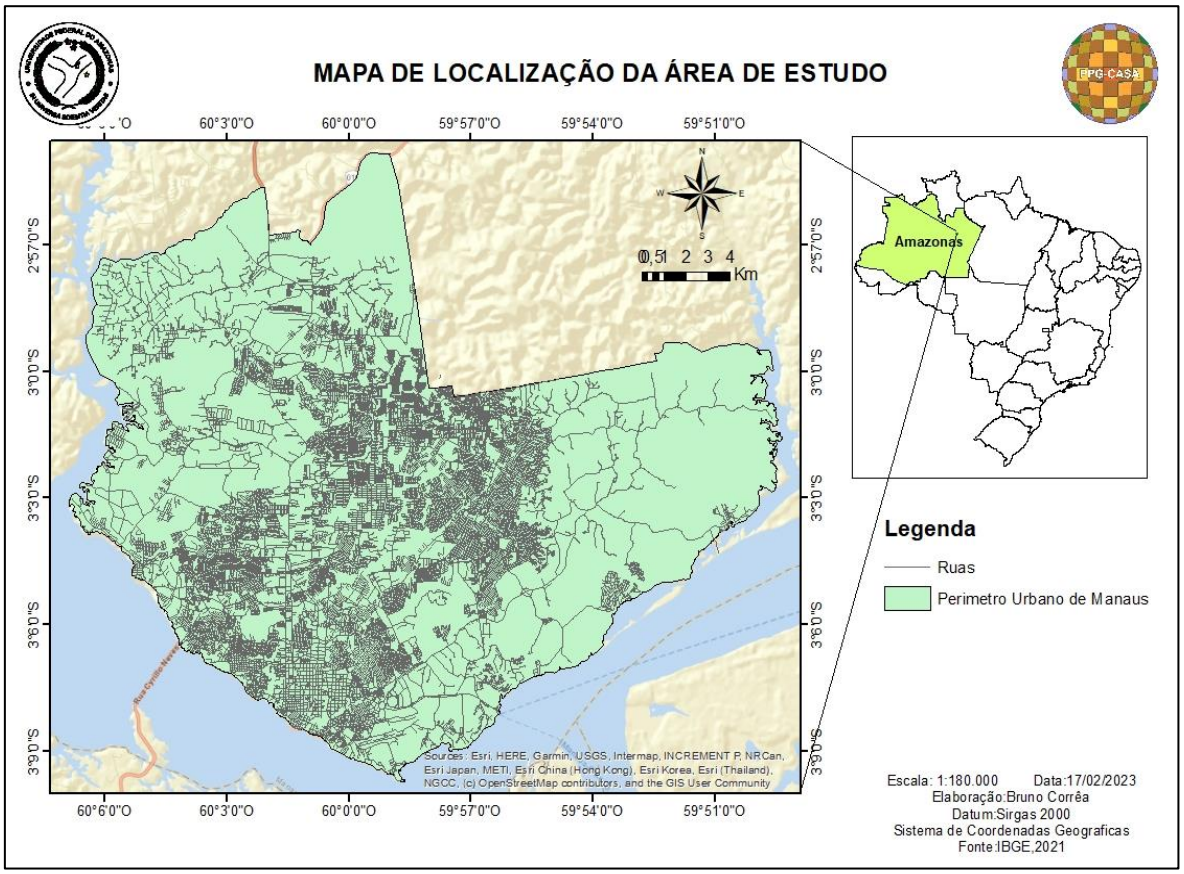
3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

3.1. Área de Estudo

Esta investigação tem como limites a malha urbana de Manaus (figura 1). Manaus é a capital do estado do Amazonas, que em extensão territorial é o maior estado do Brasil. O município de Manaus tem área de 11.401 km², caracterizada pelo clima equatorial. Com o crescimento populacional acelerado e a necessidade da expansão urbana, a urbe de Manaus vem mudando sua paisagem e promovendo um ritmo crescente de transformações e crescimento urbano (Governo do Estado do Amazonas, 2010).

A expansão desordenada e o crescimento populacional resultam em problemas como a falta de planejamento urbano, de infraestrutura, saneamento e outros. Para o estudo dos deslizamentos, buscamos compreender quais fatores dentro do espaço urbano se correlacionam para a resultante de vulnerabilidade a este tipo de desastre natural nos espaços da malha urbana.

Figura 1. Localização do perímetro urbano de Manaus.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

3.2. Caracterização do Solo

A extensão urbana de Manaus está assentada sobre a Formação Alter do Chão. Conforme os dados de sub superfície obtidos da empresa Petrobrás, a formação Alter do Chão é composta por arenitos, siltitos, argilitos e conglomerados (Caputo, 1984)No âmbito dos aspectos pedológicos, em Manaus existem os Latossolos Amarelos localizados nos platôs e na porção superior à média da encosta; e nas porções de média encosta a até próximo aos fundos de vale, encontra-se os Argissolos Amarelos e na parte inferior da encosta e nos baixios, encontram-se os solos ricos em areias, como o Espodossolo (Lucas, 1988; Vieira, 2008).

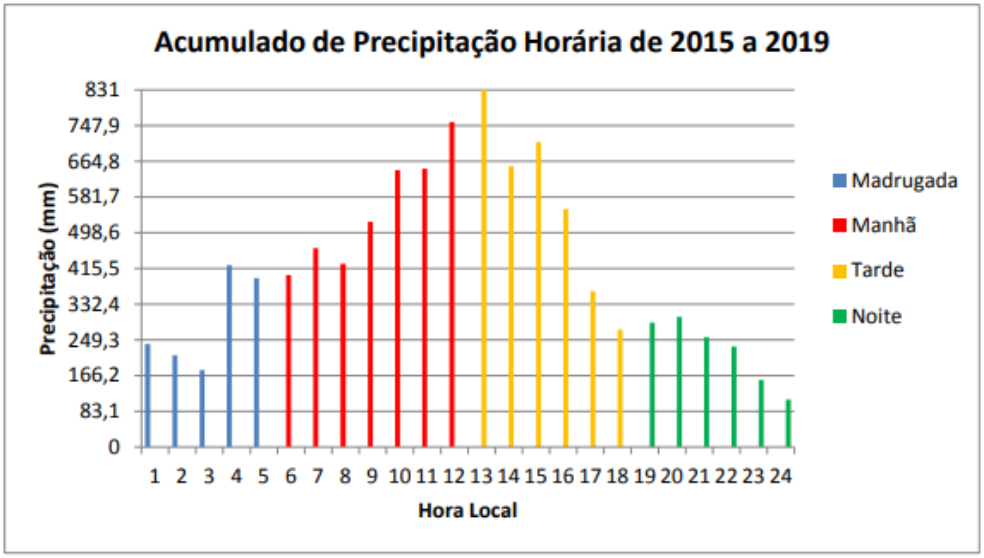
3.3. Precipitação

A região de Manaus apresenta duas estações climáticas bem definidas que são um elevado período de precipitação pluvial que se define como o inverno regional no período de janeiro a abril, por sua vez o segundo período de junho a novembro é denominado de verão amazônico. Nos meses de agosto, setembro e outubro tem-se o menor índice pluviométrico, cuja precipitação não ultrapassa 4% do total anual (Honório 2008 *apud* Bonetti, 1999).

A caracterização da intensa precipitação na área em certos períodos é na maioria influenciada pela Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) Contudo, é possível haver existências de outros fatores que contribuam na caracterização climática local, como as Brisas Fluviais, Linhas de Instabilidades, El Niño, La Niña e a Zona de convergência do Atlântico Sul. Conforme o estudo de Carvalho et al. (2022), é possível compreender a incidência pluviométrica em Manaus por períodos horários consoante a série histórica do INMET, por meio disso, o maior índice pluviométrico se orienta no período da manhã e tarde conforme a figura 2.

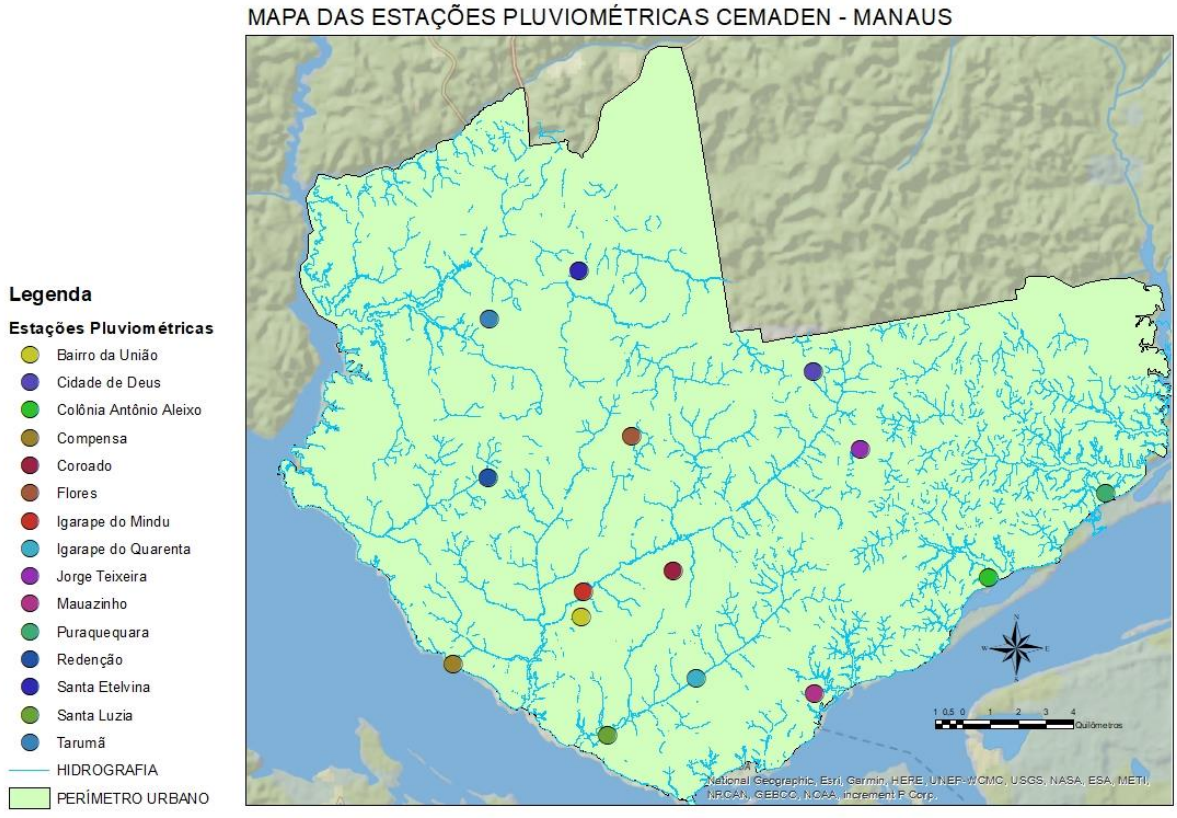
Assim, a caracterização pluviométrica convencional na cidade de Manaus possui 12 estações monitoradas pelo CEMADEN, onde se encontram localizadas na região urbana conforme a figura 3. Além dessas estações, existem as do Serviço Geológico do Brasil, situada no Aleixo, a do Aeroporto, controlada pelo Exército Brasileiro e a do INMET na Rua Maceió. A importância de uma variedade de estações na região de Manaus proporciona maior acurácia e veracidade do comportamento pluviométrico local.

Figura 2. Acumulado de precipitação horária de 2015 a 2019.



Fonte: Carvalho et al. (2022).

Figura 3. Localização das estações pluviométricas do CEMADEN em Manaus.



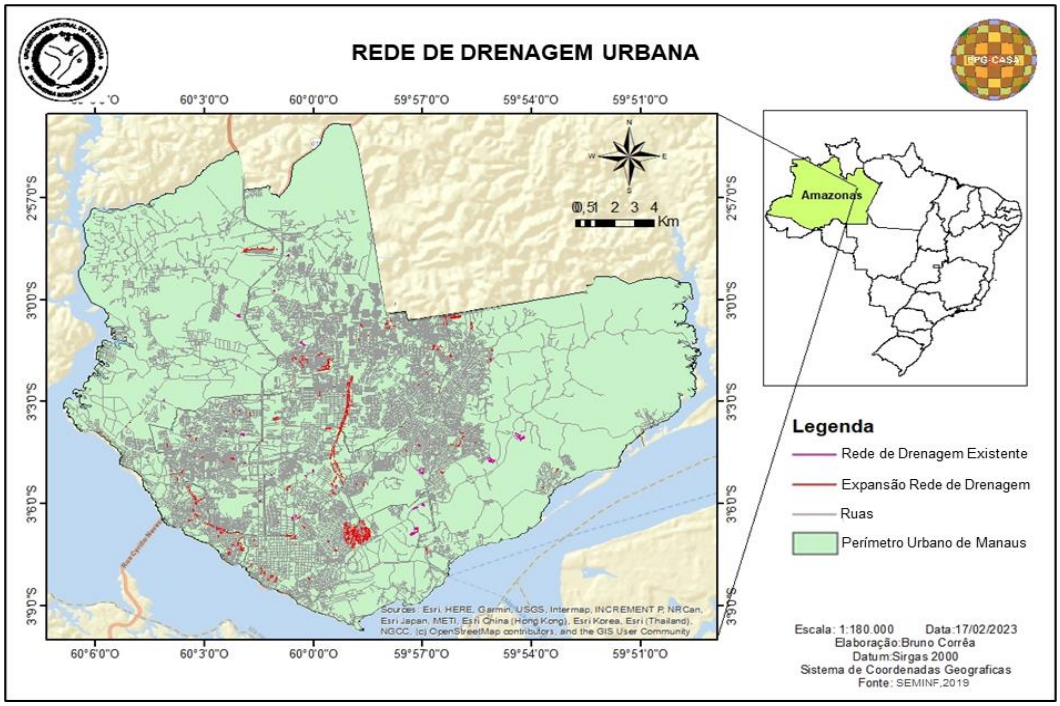
Fonte: Elaborado pelo autor.

3.4. Drenagem Urbana

A drenagem é um sistema importante no espaço urbano, pois ela está relacionada à coleta das águas pluviais e de esgoto existente na urbe. De acordo com Rodrigues (2012), quando o sistema de drenagem não é considerado desde o início da formação do planejamento urbano, é bastante provável que esse sistema, ao ser projetado, revele-se, ao mesmo tempo, de alto custo e deficiente. Dessa maneira, a ausência do sistema interfere de modo significativo na dinâmica do ciclo da água, que ocorre pelo fato de o espaço urbano ser composto por materiais que retêm a água em suas superfícies.

Na cidade de Manaus são recorrentes os fatos de desastres nas vias e regiões como enchentes e deslizamentos agravados pela má implantação do sistema de Drenagem e no inverno intensificam o índice de ocorrências devido a elevada precipitação. Segundo o Conselho Regional de Engenharia e Agronomia do Amazonas (2018), apenas 60% da implantação da nova rede de drenagem teria sido instalada. Dessa maneira, a cidade de Manaus apresenta uma necessidade na expansão da rede drenagem. Como demonstrado na figura 4**,** é possível verificar a ausência de drenagem em alguns bairros da cidade.

Figura 4. Rede de drenagem existente no perímetro urbano de Manaus.



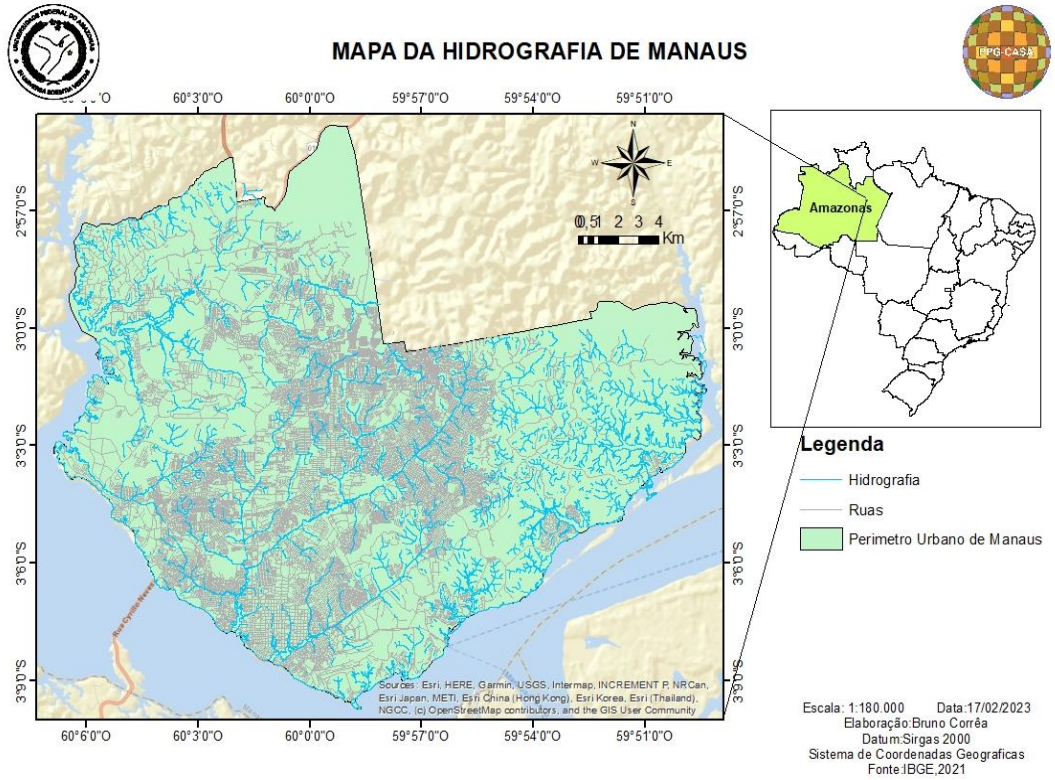
Fonte: Elaborado pelo autor.

3.5. Hidrografia

A cidade de Manaus, que está inserida no bioma da floresta amazônica, é composta por redes hidrográficas adensadas que se projetam também para dentro do seu espaço urbano, como mostra a figura 5. Partindo dessa premissa, Manaus está situada na bacia hidrográfica do rio Amazonas, na margem esquerda do rio Negro. A nascente do rio Negro ocorre na região pré-andina da Colômbia e se estende até o encontro com o rio Solimões, logo abaixo de Manaus. Desse modo, para formar o Amazonas, em seu curso percorre 1.700 quilômetros e drena áreas de baixo-relevo como também terrenos consolidados, razão da sua baixa velocidade e erosão (Cunha e Pascoaloto, 2006).

No entanto, a área urbana de Manaus, além de ser banhada por rios de grandes dimensões, também é composta por um conjunto de 10 microbacias. Enquanto os Igarapés do Mindu, Quarenta e Aleixo possuem foz no rio Negro, os Igarapés Boa Vista, Brasileirinho, Reserva e Água Branca têm a desembocadura no rio Puraquequara. O Igarapé do Mariani, a Bolívia e o Gigante formam o rio Tarumã.

Figura 5. Mapa da hidrografia urbana de Manaus.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.6. Método da Pesquisa

A abrangência da análise dos deslizamentos de solos ficou restrita à área urbana de Manaus. A perspectiva do estudo foi compreender as características locais dessa região, como declividade, índice pluviométrico, resistência do solo, caracterização do solo, direção do fluxo de escoamento e população impactada. De acordo com Rebelo (2003), a operacionalidade e a avaliação da análise do risco de desastre podem ser definidas pela relação, a saber:

Riscos de Desastres (**R**) = Ameaça (A) x Vulnerabilidade (**V**)

Assim, o risco de desastre acontece se algum evento anormal ao cotidiano ocorra (Ameaça) e na região do evento tenha um impacto ou dano gerado com perdas, ou mortes da população afetada (Vulnerabilidade). A determinação do risco de desastres é um produto onde para ocorrer é necessário de uma vulnerabilidade de pessoas na região a ser impactada, pois sem está variável a necessidade da gestão de risco de desastres se torna nulo. A partir dessa análise, os dados a utilizados para a investigação do estudo foram caracterizados conforme a Quadro 1, em acordo com a função apresentada.

Quadro 1. Caracterização dos dados observados no estudo relacionados com a relação de risco de desastres de Rebelo 2003.

	Ameaça	**Vulnerabilidade**
Risco de Desastres	Precipitação (Elevado Índice Pluvial)	Uso e ocupação do Solo e Densidade Populacional
		Solo (Aumento de Saturação)
		Escoamento (Direcionamento do fluxo)
		Declividade (Elevação de água na captação)

Fonte: Elaborado pelo autor.

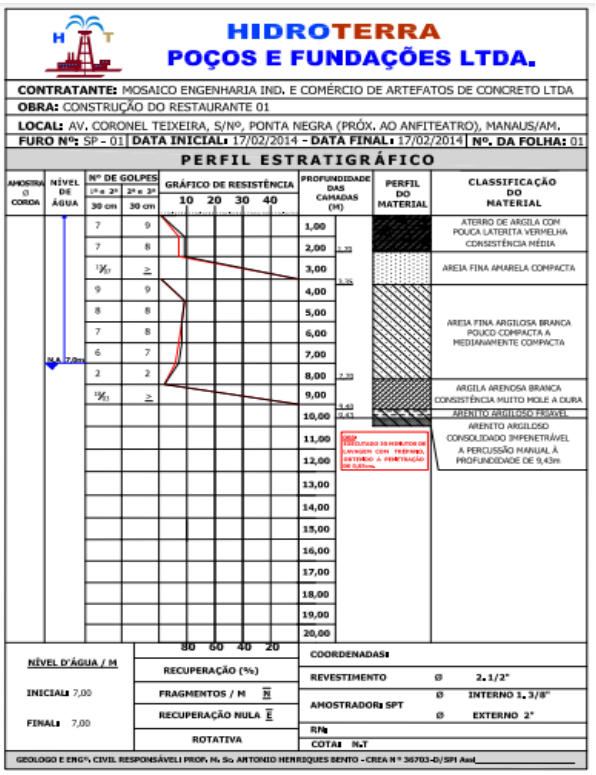
O quadro 1 apresenta a correlação dos fatores abordados no estudo e sua correlação com a metodologia de Rebelo (2003), onde o risco é o produto de ameaça e vulnerabilidade. Portanto, entre os fatores abordados, a precipitação é a variável ameaça em virtude de sua variabilidade de ocorrência e os outros fatores, como estão determinados de forma contínua a característica de uma determinada região, são segmentados a vulnerabilidade. Assim, por meio que a caracterização de risco de desastre necessita do fator de contribuição populacional, a demanda demográfica se destaca em relevância aos outros fatores abordados, pois sem a presença de vítimas, o impacto de risco tende a ser caracterizado como nulo.

3.7. Coleta dos Dados

A base das informações dos dados de deslizamentos em Manaus consiste nos registros do Sistema da Defesa Civil - SISDEC que foi disponibilizada em arquivo @Excel. A partir da planilha são registrados um quantitativo amostral conforme a figura 22 dos números de casos no período de 2002 a 2022. Os eventuais pontos amostrais serão georreferenciados através do tratamento dos dados no Excel e posteriormente plotados em ambiente digital no Q-gis 3.16.1.

A partir da plotagem dos dados deslizamentos também foram correlacionados os dados disponibilizados nas sondagens de SPT realizadas pelas empresas de Manaus que trabalham com o serviço de sondagens de solo. A informação obtida no boletim de sondagem conforme a figura 16 foram tabeladas e disponibilizadas pelo Serviço Geológico do Brasil para o embasamento na caracterização das camadas superficiais do solo. Através das perfurações de sondagens foi possível compreender a resistência do solo, as caracterizações físicas da composição das camadas do solo.

Figura 6. Boletim de sondagem de solo.



Fonte: Serviço Geológico do Brasil, 2023.

A outra base de dados construída relacionou os índices de precipitação acumuladas diárias disponibilizadas pelo INMET, CEMADEN e o SGB. O monitoramento do índice pluviométrico acumulado diário ocorre pela coleta da chuva no recipiente chamado pluviômetro (figura 7) onde é possível o modelo de estação pluviométrica. Logo após o levantamento dessas informações e a tabulação dos mesmos no Excel, os dados foram georreferenciados no Q-gis 3.16.1.

Figura 7. Estação pluviométrica convencional.

Fonte: Serviço Geológico do Brasil, 2020.

3.8. Análise e Tratamento dos Dados

Os dados foram analisados dentro de software Q-gis 3.16.1. que correlaciona as informações coletadas e suas características. A primeira investigação do estudo foi composta do levantamento dos índices pluviométricos com as incidências de deslizamento no espaço urbano de Manaus, por meio disso possibilitando a filtragem das informações e a analisando-se o fator de contribuição das águas pluviais para esse fenômeno. Posteriormente após a análise e validação dessa investigação, por meio da krigagem e análise hierárquica buscou-se compreender os limiares de precipitação acumulada para estimar cotas de alerta, e verificar o valor de contribuição dos outros fatores na estimativa do grau de risco de cada zona da cidade de Manaus.

3.9. Modelagem da Superfície do Terreno

A modelagem digital de elevação (MDE) para a determinação das classes de declividade em Manaus foi embasada nos dados SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission)*. O uso desses dados é disponibilizado gratuitamente pelo INPE. Assim, a partir da modelagem, foi possível estimar a altimetria da superfície urbana de Manaus.

O levantamento da direção de escoamento foi desenvolvido por meio da análise de imagem *raster* com o emprego da análise da matriz dos *pixels* que determina a direção do fluido na superfície do terreno. O *raster* é um produto resultante de imagem de satélite, por meio disso apresenta uma matriz com valores terminados a cada quadrícula e a variação dos *pixels* determina o direcionamento do fluxo hídrico. Na elaboração da modelagem, também com o uso da imagem de satélite, será elaborado o mapa de uso e ocupação do solo, por meio disso caracterizando a região de vulnerabilidade na relação ameaça x risco apresentada por Rebelo (2003) para a determinação de risco de desastres.

3.10. Modelagem Estatística Espacial

O método da modelagem temporal foi empregado para compreender os dados de precipitação em relação aos dados de deslizamentos registrados pela Defesa Civil Municipal, por meio dessa análise estatística descrever o padrão existente nessa relação de fenômenos. A partir dessa primeira análise a modelagem espacial dos dados de precipitação, caracterização do solo, relevo e casos de deslizamentos teve

como base a espacialização dessas ocorrências apresentadas em dados pontuais georreferenciados conforme as informações disponibilizadas pelo INMET, CEMADEN, Serviço Geológico do Brasil e da Defesa Civil.

As informações serão interpoladas no dimensionamento da área de superfície urbana de Manaus, por meio disso utiliza-se o método de grade que propicie expansão da análise da correlação das estáticas das informações abordadas no estudo. Os dados pontuais nessa metodologia auxiliaram como amostragens de informações a serem interpoladas e estimados os valores das grades embasadas na sistemática estatística que expresse o comportamento da informação de modo espacial.

A modelagem resultou na equação dos fatores observados no estudo, suas constantes diferenciadas conforme o grau de influência sobre a ação do deslizamento. A equação foi aplicada na calculadora de mapas do Q-gis 3.16.1, que por meio da relação dos dados permitiu gerar um mapa de alerta dos pontos de vulnerabilidade de riscos de desastres de deslizamentos segundo os dados de faixas de volume de precipitação acumulada diária.

CAPÍTULO I

1. Movimentação de Massa

A ação da movimentação do solo é uma atividade geológica que impacta a sociedade urbana em seus aspectos sociais e econômicos. As características distintas das regiões onde ocorre a movimentação de solo podem ser resultantes de diversos fatores antrópicos ou ambientais. Assim, na tentativa de compreender o fenômeno de movimentação de terras e mitigar seus impactos negativos, é importante ocorrer a investigação dos processos, o levantamento das características do meio físico, o zoneamento ou hierarquização das áreas sujeitas à ocorrência de movimentos de massa e processos correlatos, permitindo assim, uma previsão de futuros problemas e intervenções (Bonuccelli, 1999).

1.1 Definição

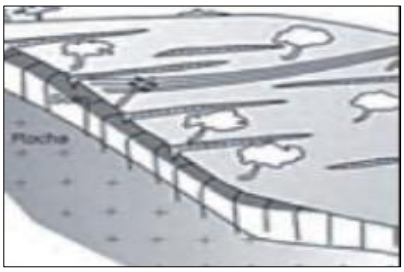
A movimentação da superfície terrestre é um processo natural e os fatores que colaboram para o fenômeno estão ligados ao movimento das placas tectônicas, bem como aos fatores climáticos regionais. Guerra e Marçal (2006, p. 75-76) definem a movimentação de massa como “o transporte coletivo de material rochoso e/ou de solo, onde a ação da gravidade tem papel preponderante, podendo ser potencializado, ou não, pela ação da água”.

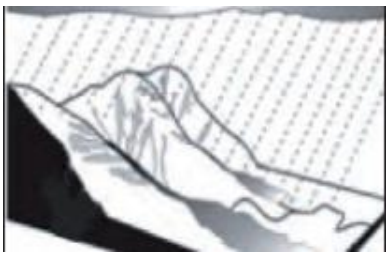
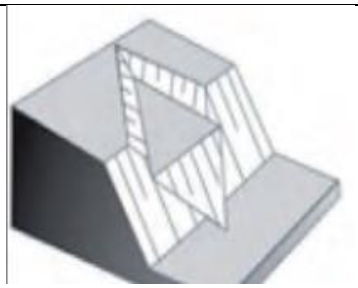
De acordo com Costa (2017), os deslizamentos e processos erosivos consistem em importante processo natural que atua na modelação do relevo e que contribui para a evolução das paisagens. A partir dessa concepção, os deslizamentos são uma atividade de grande influência na geomorfologia. A importância desse tipo fenômeno está relacionada com vertentes ou encostas caracterizadas como superfícies inclinadas, que possuem quatro dimensões bem delimitadas como altura, extensão, o limite interno constituído pelo embasamento rochoso e as dimensões temporal e espacial representado pelos depósitos antigos ou depósitos correlativos (Casseti, 2005).

1.1.1. Classificação dos Tipos de Movimentos de Massa

O termo genérico escorregamentos ou deslizamentos engloba uma variedade de tipos de movimentos de massa de solos, rochas ou detritos, gerados pela ação da gravidade, em terrenos inclinados, tendo como fator deflagrador principal a infiltração de água, principalmente das chuvas. No quadro 2, é possível compreender algumas formas de deslizamentos e examinar suas características e o modo como ocorrem na superfície da terra.

Quadro 2. Descrição dos tipos de deslizamentos.

Ilustração	**Tipos de Deslizamentos**	**Descrição**
	Rastejo	Caracterizado pela movimentação lenta, descendente e contínua do solo de um talude. Assim, sendo uma deformação plástica, sem geometria e superfície de rupturas definidas.
	Queda de Blocos	São movimentos rápidos de blocos ou rochas ocasionados pela gravidade que não necessitam de uma superfície de deslizamento. A ação desse tipo de deslizamento ocorre em taludes ou encostas íngremes.
	Rolamento de Matacões	É a movimentação de rochas de grande porte que ocorre em superfície inclinadas. A ação desse tipo de deslizamento surge pela perda de algum apoio ou vegetal que estabilizava a rocha nesse solo exposto.

	Corridas de Lamas	São movimentos de dinâmica hibrida com materiais sólidos e fluidos que podem alcançar quilômetros. A ação que ocasiona essa movimentação é gravitacional e ocorre com escoamento rápido.
	Deslizamento de Cunha	É um deslocamento na forma de prisma que ocorrem.
	Deslizamento de Planar	Nos taludes ou encostas que sofreram algum desconfinamento natural ou antrópico.
	Deslizamento Rotacional	São deslizamentos com superfícies curvas ocasionadas por uma série de fatores, e podem se apresentar em regiões de solo sedimentar e aterros.

Fonte: Adaptado IPT, 2007.

Ao analisarmos as diferentes tipologias de movimentação de massa é possível compreender que em algumas circunstâncias podem originar mais de um tipo de ação em uma mesma região. Logo, a importância da caracterização para a investigação técnica é fundamental na elaboração de mecanismos de minimização de impactos.

1.1.2. Fatores Relacionados a Movimentação de Massa

A movimentação de massa é um processo que apresenta diversos fatores relacionados na sua caracterização, como aspectos físicos, ambientais e antrópicos.

De acordo com Terzaghi (1950), as causas dos movimentos de massa podem ser classificadas em dois grupos conforme a característica do talude:

I. Causas internas: resultam da diminuição na resistência disponível do material (aumento da pressão hidrostática, diminuição da coesão e ângulo de atrito interno por alteração).

II. Causas externas: produzem o aumento das tensões cisalhamento por modificação da morfologia do talude.

Na perspectiva de Varnes (1978 *apud* Gerscovich, 2012), o aumento de solicitações e redução da resistência de cisalhamento resultam em diversos fatores que ocasionam a movimentação de massa. O quadro 3 apresenta a esquematização dessas ações, fatores e fenômenos.

Quadro 3. Fatores causadores dos movimentos de massa.

Ação	Fatores	Fenômenos
Aumento das Solicitações	Remoção de massa (lateral ou da base)	Erosão, escorregamentos, cortes
	Sobrecarga	Peso da água de chuva, neve, granizo etc. Acúmulo natural de material (depósitos) Peso da vegetação Construção de estruturas, aterros etc.
	Solicitações dinâmicas	Terremotos, ondas, vulcões etc. Explosões, tráfego, sismos induzidos.
	Pressões Laterais	Água em trincas, material expansivo etc.
Redução da Resistência	Características inerentes ao material (textura, estrutura etc.)	Características geomecânicas do material, estado de tensão inicial.
	Mudança nas características do Material	Intemperismo, redução da coesão, ângulo de atrito. Elevação do nível d'água.
	Outras Causas	Enfraquecimento devido ao rastejo progressivo, ação de raízes e animais.

Fonte: Varnes, 1978 *apud* Guidicini e Nieble, 1984.

Assim, os fatores causadores do movimento de massa são multivariados, o que resulta na busca por investigações técnicas que aprimorem a compreensão desse fenômeno natural. Segundo Maciel Filho e Nummer (2014), as principais causas para os movimentos de massa e para a alteração do equilíbrio das forças nas vertentes são: elevação do nível piezométrico em taludes, o efeito de oscilações térmicas, a diminuição dos parâmetros de resistência por intemperismo, as mudanças geométricas do talude, o rebaixamento rápido do nível da água em barragens ou enchentes, a erosão subterrânea retrogressiva (piping), a diminuição do efeito de coesão aparente, entre outras. Desse modo, neste estudo, os fatores selecionados para a análise de deslizamentos em Manaus foram: o índice pluviométrico, o nível do aquífero, a declividade e a coesão do solo, como detalhado nos capítulos seguintes.

CAPÍTULO II

1. Investigação de Subsolo

O solo é composto por uma diversidade de matérias e especificações distintas em sua variabilidade. É formado por um conjunto composto de várias camadas distintas em sua tipologia, que determinam a sua classificação e os fatores específicos como resistência à compressão, dentre outros. A partir dessa perspectiva, é fundamental que, em qualquer atividade de uso, o solo seja investigado quanto às suas especificações para ser possível avaliar a sua adequada ao uso. De acordo com Lopes e Mendes (2020), a investigação de solo na engenharia é uma parte indispensável para o parecer de um projeto, seja ele de grande, médio ou pequeno porte.

Nas formas de investigação do solo existem as sondagens geotécnicas que são mecanismo de coletas de pontos amostrais para a caracterização de uma determinada área. As sondagens fornecem informações muito relevantes à escolha do tipo solo e sobre as delimitações de seus atributos dentre os quais, o nível do lençol freático, a profundidade dos horizontes, a presença de rochas no perfil do terreno e determinam a constância da superfície às tensões nele impostas (Severiano et al., 2022).

A sondagem é uma atividade que possui diferentes metodologias para a execução da análise do solo. As diversas metodologias podem ser caracterizadas algumas conforme o quadro 4, a saber:

Quadro 4. Tipos de sondagens.

Tipo	Descrição
Sondagem a Trado	O método tem por objetivo determinar o nível d'água e os tipos e espessuras dos solos encontrados. É executado com trado de diâmetro externo 4" ou 2 ½" até que se encontre o lençol freático, prosseguindo o quanto as paredes do furo permitirem e seguindo as normas da ABNT NBR 9603:1988.

Sondagem a Percussão	O objetivo desse método é determinar os tipos de solo, suas profundidades de ocorrência e seus índices de resistência a penetração e a posição do nível d'água local. Utiliza-se o trado de diâmetro externo 4", até ser encontrado o nível d'água, prosseguindo então com o método de perfuração por circulação de água (lavagem), sendo normatizado pela norma ABNT NBR 6484:2011.
Sondagem Rotativa	Um método entre as sondagens geotécnicas que investigam os solos e as rochas, realiza a perfuração por conjunto motomecanizado, projetado para que se obtenha amostras de materiais rochosos. Além disso, sua execução utiliza-se de sondas rotativas, providas de hastes, coroa de corte e barrilete amostrador.

Fonte: GeoPesquisa, 2024.

Assim sendo, neste estudo sobre a vulnerabilidade a deslizamento em Manaus, foram usados como variável explicativa os dados de sondagem a percussão. A escolha metodológica da sondagem se baseia na ampla utilização desse método na região e sua intensa aplicabilidade, o que em custo-benefício é viável para as construtoras solicitantes. Assim, a abordagem nos itens 2.2 e 2.3 tem o objetivo de detalhar a sondagem a percussão e sua utilização geotécnica utilizada neste estudo.

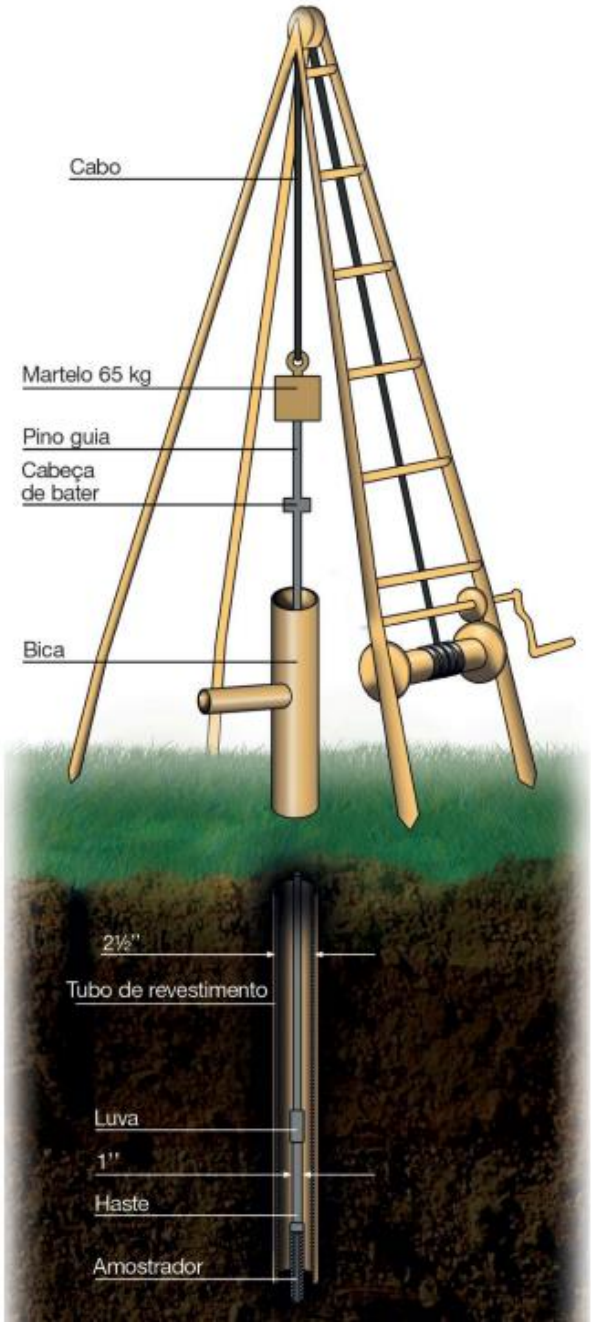
2.1. Sondagem a Percussão - Definição e Procedimentos

Segundo Silva *et al*. (2021), na construção civil, o método mais utilizado de sondagem para investigação geológico-geotécnico é Standard Penetration Test – SPT, em virtude de favorecer a execução, e ainda, em razão do seu baixo custo quando comparado a outros métodos de sondagem. A sondagem a percussão (SPT), ou sondagem de simples reconhecimento, é executada para obter amostras pouco deformadas e valores quantitativos de resistência dos solos por meio de ensaios expeditos padronizados, denominados SPT (Standard Penetration Test) - também conhecidos como ensaios de penetração (Souza; Silva; Lyomasa, 1998). A metodologia de sondagem a percussão utilizada em escala global e no Brasil é regulamentada pela norma NBR 6484:2020 da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT.

A Norma Brasileira 6484/2020 apresenta que o grau de resistência à penetração de uma região é determinado por sondagem SPT, ele também analisa a tipologia do solo em cada profundidade, além da metodologia, conseguir investigar a posição do

nível do lenço freático e permitir a coleta de informações sobre todas as camadas analisadas na sondagem. A metodologia desse tipo de sondagem é composta pelo equipamento mostrado na figura 8, composto por amostrador, hastes, martelo, tripé de sondagem, cabeça de bater e conjunto de perfuração.

Figura 8. Esquema dos equipamentos de sondagem SPT



Fonte: Schnaid e Odebrecht (2012).

A sistemática conjunta dessas ferramentas é apresentar um procedimento de perfuração com resultados estáveis sem interferências na execução que venham impactar nas informações obtidas na sondagem. No quadro 5 demostra como as descrições de golpes por trechos podem ser apresentadas no boletim de sondagem a percussão – SPT.

Quadro 5. Apresentação das penetrações na sondagem a percussão.

Penetração	Registro dos golpes	Exemplo
Penetração de 45 cm Três trechos iguais a 15 cm	Golpes por trecho	3/15 – 3/15 – 4/15
Penetração diferente de 45 cm Trechos diferentes de 15 cm	Número de golpes para uma penetração imediatamente superior a 15 cm	3/17 – 4/14 – 5/15
Penetração superior a 45 cm com a aplicação do primeiro golpe de martelo	Número de golpes e respectiva penetração	jan./58
Penetração com haste e amostrador, sem número de golpes	Sem número de golpes	PH/50
Penetração com martelo, haste e amostrador, sem número de golpes	Sem número de golpes	PM/70
Penetração superior a 45 cm com a aplicação de poucos golpes do martelo	Número de golpes e respectiva penetração nos respectivos intervalos	1/33 – 1/20
Penetração inferior a 45 cm. Se em qualquer dos três segmentos, o número de golpes ultrapassar 30	Número de golpes para cada intervalo de penetração	32/15
Se não for observado avanço do amostrador durante a aplicação de cinco golpes sucessivos do martelo	Número de golpes para zero centímetros de penetração	5/0

Fonte: NBR 6484, 2020.

Dessa forma, o registro dessas penetrações no solo serve de base para modelagens matemáticas que orientam a caracterização da resistência e outros

fatores do solo. Assim, os resultados dos boletins são correlacionados com projetos e parâmetros geotécnicos para determinar as especificações necessárias para que uma implantação ou inferência no uso do solo dessa região tenha o menor impacto ambiental possível.

2.2. Correlação dos Parâmetros Geotécnicos

Os resultados obtidos nas sondagens SPT podem ser interpretados por dois métodos de análise que são as diretas e as indiretas. Segundo Schnaid e Odebrecht (2012), esses métodos podem ser definidos como:

> a) ***Métodos indiretos****: os resultados do ensaio SPT são utilizados na previsão de parâmetros constitutivos, representativos do comportamento do solo.*
> b) ***Métodos diretos:*** *os resultados do ensaio SPT são aplicados diretamente na previsão da capacidade de carga ou recalque de um elemento de fundação, sem a necessidade de determinar parâmetros intermediários.*

O método é definido conforme a finalidade da informação necessária a ser interpretada em projeto ou estudo. Assim a para melhor compreensão será explanado nos itens **2.3.1 Métodos Indiretos** e **2.3.2 Métodos Diretos** a sistemática utilizadas nesses procedimentos de correlação geotécnica, por meio disso segmentando a melhor análise a ser implantada no estudo da análise a vulnerabilidade a deslizamentos em Manaus.

2.2.1. Métodos Indiretos

Os métodos indiretos são aqueles direcionados a entender as especificidades das camadas e tipologias de um determinado solo. A correlação do NSPT com parâmetros geotécnicos está relacionada ao ângulo de atrito, coeficiente de empuxo, módulo de elasticidade, resistência e outros parâmetros. Assim, no estudo, foi utilizada a metodologia indireta para a interpretação das sondagens SPT em Manaus, por meio disso abordando as correlações para determinação do peso específico, ângulo de atrito e coesão de solos.

2.2.1.1. Peso Específico

O peso específico de um solo é um parâmetro que necessita de ensaios laboratoriais, partindo das circunstâncias da ausência dessa análise Godoy (1972) elabora uma sistemática que viabilize adotar valores aproximados conforme as tabelas 1 e 2, baseadas em função da consistência da argila e compacidade da areia. Assim a correlação desses parâmetros é relacionada a função do índice de resistência a penetração (N) do SPT conforme a Norma Brasileira 7250/82.

Tabela 1. Peso específico de solos argilosos.

N (golpes)	**Consistência**	**Peso específico (KN/m3)**
≤ 2	Muito mole	13
03/mai.	Mole	15
06/out.	Média	17
Nov./19	Rija	19
≥ 20	Dura	21

Fonte: Godoy, 1972.

Tabela 2. Peso específico de solos arenosos.

N (golpes)	**Consistência**	**Peso específico (KN/m3)**		
		Areia seca	**Úmida**	**Saturada**
< 5 5 - 8	Fofa Pouco compacta	16	18	19
9 – 18	Medianamente compacta	17	19	20
19 - 40 > 40	Compacta Muito compacta	18	20	21

Fonte: Godoy, 1972.

2.2.1.2. Ângulo de Atrito

A relação de parâmetro do ângulo de atrito com o SPT é baseada em metodologias desenvolvidas Godoy (1983), Teixeira (1996) e Hatanaka e Uchida (1996). As equações I, II e III apresentam as propostas dos respectivos autores apresentados.

a) Godoy (1983)

$$\emptyset' = 28° + 0{,}4\ N_{SPT} \text{ (Equação I)}$$

b) Método de Teixeira (1996):

$$\emptyset' = 15° + 24\ N_{SPT} \text{ (Equação II)}$$

c) Método Hatanaka e Uchida (1996):

$$\emptyset' = 20° + \sqrt{15{,}4\ N_{SPT,60}} \text{ (Equação III)}$$

Na análise de solos granulares, as equações mais utilizadas para a estimativa do ângulo de atrito interno foram propostas por Teixeira (1996) e Hatanaka e Uchida (1996). Logo, segundo a análise das equações, podemos compreender os seguintes parâmetros:

$\emptyset$ = ângulo de atrito;
N_{SPT}= índice de resistência à penetração dinâmica em sondagem SPT;
$N_{SPT,60}$ = índice de resistência à penetração dinâmica em sondagem SPT, conforme padrão internacional.

O Schnaid e Odebrecht (2012) apresentam uma modelagem de equação onde $N_{SPT,60}$ tem correlação com os valores nacionais de penetração conforme **a Equação IV**.

$$N_{SPT,60} = (N_{SPT} \text{ x Energia Aplicada}) / 0{,}60 \qquad \text{(Equação IV)}$$

Assim, a metodologia determina que a energia aplicada na execução do acionamento do martelo em ensaio de acordo com normativa brasileira é de 66%.

2.2.1.3. Coesão

Segundo Lucas e Faveri (2021), a coesão do solo é a força de atração entre as superfícies de suas partículas, podendo ela ser real ou aparente. A definição do parâmetro da coesão é derivada principalmente do critério de Mohr Coulomb e é usado para descrever a parcela sem fricção da resistência de cisalhamento, que é independente da tensão normal (VAZ, 2014).

Consequentemente, pelo fato de a coesão ser um parâmetro relacionado à resistência de cisalhamento, são observados fatores como tensões, velocidade de carregamento e de dissipação do excesso de poropressão. De acordo com Tonus (2009), essa relação com esses fatores possibilita uma maior dificuldade em correlacionar seus valores com dados de ensaios SPT, logo, não existem muitas formulações disponíveis na literatura. Assim, na investigação metodológica a ser aplicada no estudo, se embasa na investigação de Marangon (2009), que demostra a correlação aproximada à proposta por Terzaghi e Peck (1948), quer por meio da **equação V** mostra a combinação do valor de coesão em tsf (tons force per square foot) e N_{SPT}.

$$c' \cong Nspt / \alpha \quad \text{(Equação V)}$$

Observa-se que a simbologia da equação a saber:

c′ = coesão drenada (tsf);
Nspt = índice de resistência à penetração dinâmica em sondagem SPT;
α = coeficiente em função do tipo de solo.

Na equação podem ser definidos a **"α"** valores de ordem 27 para argilas de baixa plasticidade e siltes argilosos, 13 em argilas medianamente plásticas e 8 argilas com alta plasticidade. Na proposta de generalização ao valor de **"α"** Terzaghi e Peck (1948) propõe uma ordem de 15 a ser adotado na metodologia.

Logo também existem outras metodologias geotécnicas aprestadas nas bibliografias para relacionar os valores de N_{SPT} e os parâmetros de coesão e ângulo de atrito como a tabela 3 que apresenta e relação estimada por Joppert Júnior (2007).

Tabela 3. Correlação dos parâmetros geotécnicos.

TIPO DE SOLO	FAIXA DE N_{SPT}	PESO ESPECÍFICO (t/m 3)		ÂNGULO DE ATRITO EFETIVO	COESÃO EFETIVA (tf/m2)
		NATURAL	SATURADO		
Areia pouco siltosa / pouco argilosa	0 - 4	1,7	1,8	25º	-
	5 - 8	1,8	1,9	30º	-
	09 - 18	1,9	2,0	32º	-
	19 - 41	2,0	2,1	35º	-
	≥ 41	2,0	2,1	38°	-

Areia média e fina muito argilosa	0 - 4	1,7	1,8	25º	0
	5 - 8	1,8	1,9	28º	0,5
	9 - 18	1,9	2,0	30°	0,75
	19 - 41	2,0	2,1	32º	1,0
Argila siltosa pouco arenosa (terciário)	0 - 2	1,7	1,8	20º	0,75
	3 - 5	1,8	1,9	23º	1,5
	6 - 10	1,9	1,9	24º	2,0
	11 - 19	1,9	1,9	24º	3,0
	20 - 30	2,0	2,0	25º	4,0
	≥30	2,0	2,0	25º	5,0
Argila porosa vermelha e amarela	0 - 2	1,5	1,7	20º	0,75
	3 - 5	1,6	1,7	23º	1,5
	6 - 10	1,7	1,8	25º	3
	≥10	1,8	1,9	25º	3,0 a 7,0
Argila arenosa pouco siltosa	0 - 2	1,5	1,7	15º	1,0
	3 - 5	1,7	1,8	15º	2,0
	6 - 10	1,8	1,9	18º	3,5
	11 - 19	1,9	1,9	20º	5,0
	≥ 20	2,0	2,0	25º	6,5
Turfa / argila orgânica (quaternário)	0 - 1	1,1	1,1	15º	0,5
	2 - 5	1,2	1,2	15º	1
Silte arenoso pouco argiloso (residual)	5 - 8	1,8	1,9	25º	1,5
	9 - 18	1,9	2,0	26º	2
	19 - 41	2	2,0	27º	3
	≥ 41	2,1	2,1	28º	5,0

Fonte: Joppert Jr., 2007.

2.2.2. Métodos Diretos

A metodologia direta de sondagem SPT acontece com a aplicação dos resultados, obtiverem dados quanto à tensão admissível de solos e a previsão de recalques decorrentes de acréscimos de tensão devido a sobrecargas (Schnaid E Odebrecht, 2012). Partindo dessa premissa, essa análise não necessita de parâmetros de correlação, o que impossibilita uma investigação qualitativa dos valores resultantes da sondagem. Dessa forma, essa metodologia é uma análise de execução direta no momento da sondagem e está relacionada à parte de recalques e tensões, onde essas informações são usadas para separar projetos de fundações e estruturas. Assim, a abordagem do método direto sobre os recalques, tensões e sobrecargas no solo são informações limitadas na investigação dos dados e ausentes para o

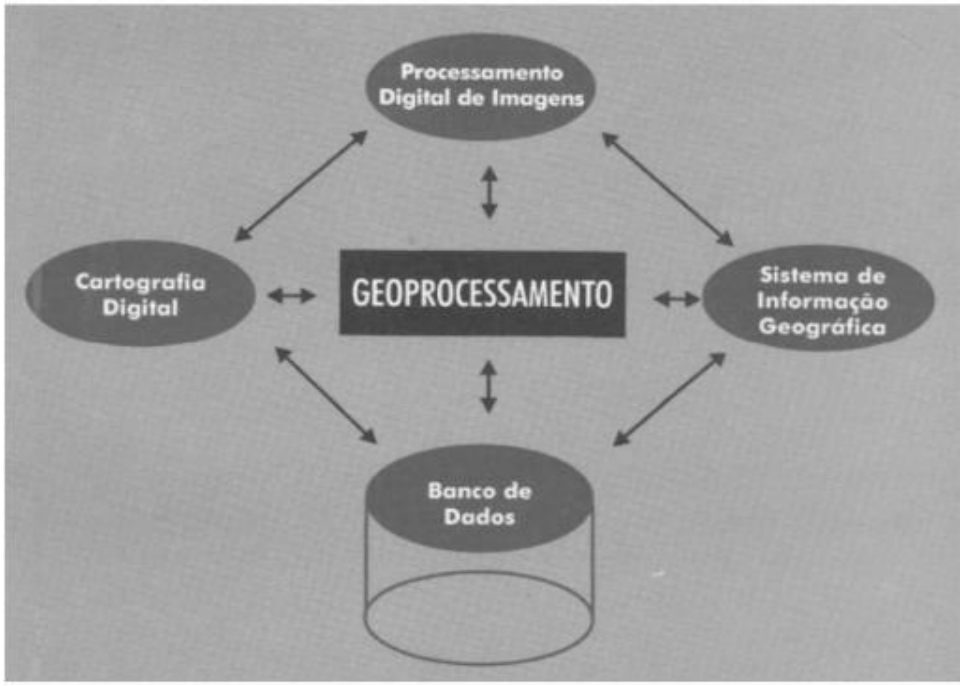
desenvolvimento do estudo. Por meio disso, a metodologia direta não necessita ser apresentada de modo detalhado neste capítulo.

CAPÍTULO III

2. Geoprocessamento

O geoprocessamento pode ser definido como o conjunto de técnicas e métodos teóricos e computacionais relacionados com a coleta, entrada, armazenamento, tratamento e processamento de dados, a fim de gerar novos dados e/ou informações espaciais, ou georreferenciadas (Zaidan, 2017). Partindo-se dessa premissa, o Geoprocessamento é a ciência que se baseia em técnicas matemáticas e computacionais para o desenvolvimento metodológico de uma informação correlacionado ao espaço geográfico, por meio disso esse recurso é aplicado nas diversas áreas de conhecimento com transporte, planejamento urbano e ambiental, na saúde e outros. Logo, a figura 9 apresenta os itens que englobam as segmentações de informações necessárias para a aplicação do geoprocessamento.

Figura 9. Fluxograma da estrutura metodológica do geoprocessamento.



Fonte: Rosa, 2013.

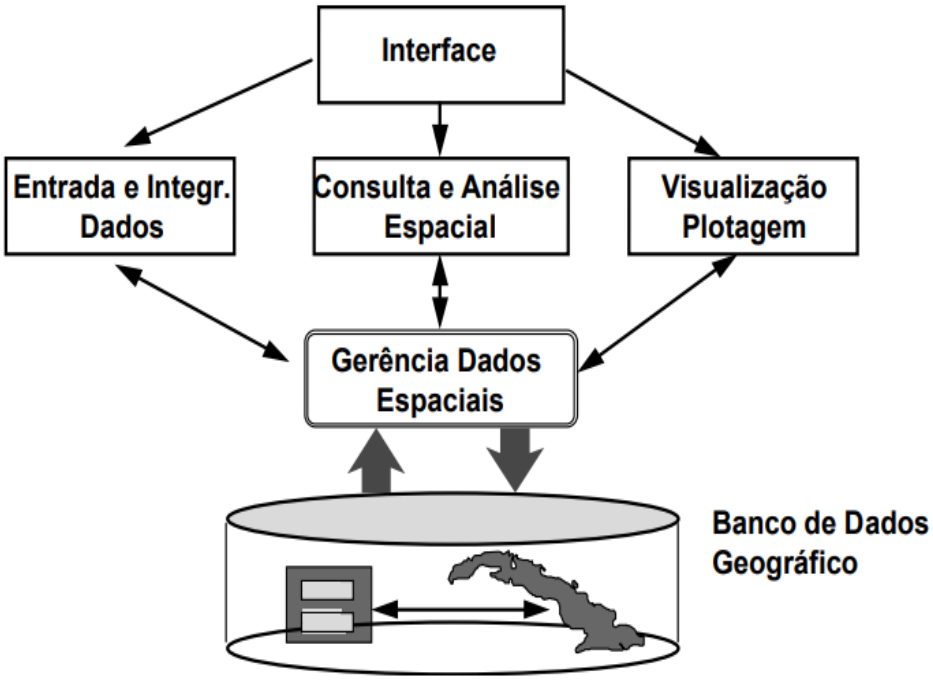
Ao observar a sistemática da figura 9, pode-se compreender que a cartografia é relação do esboço da base por mapas ou desenhos, que no processamento digital de imagens é aprimorado por um conjunto de ferramentas e mecanismos baseados em modelagens numéricas sessas imagens ou dados de satélites para a diminuição os ruídos de informações. Assim, o Sistema de informação geográfica é onde são trabalhados os dados, a manipulação das informações e armazenado que estará no banco de dados.

3.1. Sistema de Informação Geográfica SIG

Os recursos das geotecnologias para o desenvolvimento de planejamentos urbanos e ambientais é uma didática utilizada em muitos países. A partir disso, a introdução da ferramenta do Geoprocessamento no Brasil surgiu por meio dos esforços do professor Jorge Xavier da Silva (UFRJ). O geoprocessamento iniciou em 1982 com o convite de Jorge Silva ao Dr. Roger Tomlinson, responsável pela criação do primeiro SIG (Canadian Geographical Information System) para apresentar a tecnologia ao Brasil.

A sigla SIG significa sistema de informações geográficas, por meio disso, o geoprocessamento é o processo dos dados dessas informações. Uma definição clássica de SIG seria a de um sistema automatizado de coleta, armazenamento, manipulação e saída de dados cartográficos (Burrough e Mcdonnell, 1998). Partindo-se dessa premissa, o geoprocessamento é um sistema de tratamento de dados que engloba conjunto de recursos (SIG) conforme a figura 10, por meio disso os resultados são modelagens de mapas ou sistemas que auxiliem na projeção espacial de alguma informação. Contudo, o geoprocessamento são essas ferramentas do sensoriamento remoto, a digitalização de dados, a automação de tarefas cartográficas, a utilização de sistemas de posicionamento global (GPS) e os sistemas de informações geográficas (Santos et al., 2004).

Figura 10. Estrutura de Sistemas de Informação Geográfica.



Fonte: CÂMARA e QUEIROZ, 2006.

De acordo com Aronoff (1989) e Bull (1994), os SIGs são sistemas automatizados usados para armazenar, analisar e manipular dados que representam objetos e fenômenos em que a localização geográfica é uma característica inerente à informação e indispensável para as análises. Consequentemente o uso do SIGs na elaboração técnica do estudo a deslizamentos urbanos em Manaus é uma ferramenta fundamental em virtude que as localizações desses registros de eventos trazem informações ambientais importantes e que relacionados a geografia possibilitam uma melhor na análise para o mapeamento de suscetibilidade a deslizamentos.

Assim, o avanço tecnológico e a utilização do geoprocessamento são mecanismos que no desenvolvimento de metodologias para controle, gestão e monitoramentos de espaços urbanos e ambientais relacionadas as diversas segmentações de estudo é cada vez mais necessário. Para este estudo sobre a cidade de Manaus, buscou-se aprimorar o mapeamento das zonas com suscetibilidades a deslizamento e correlacionar com outros fatores ambientais, por meio desse cruzamento de dados socioambientais determinar quais fatores desencadeiam o surgimento desses eventos no espaço urbano de Manaus.

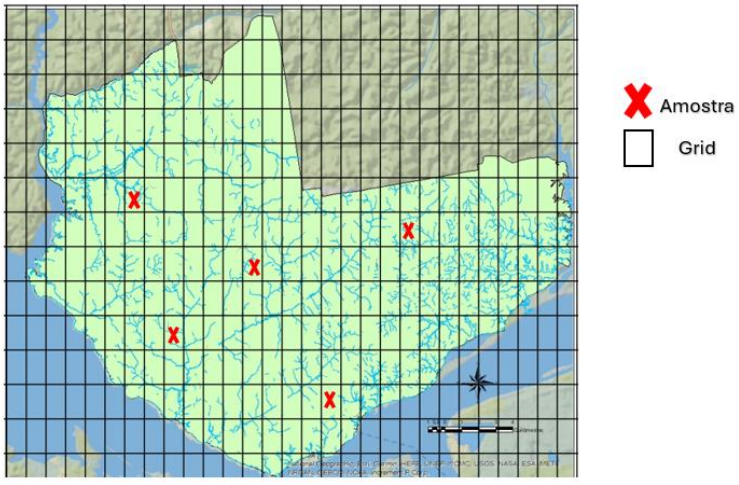
3.2. Geoestatística

O SIG é uma metodologia que permite inúmeras abordagens de análises de dados e entre elas se encontra a geoestatística. A geoestatística busca correlacionar as mais diversas informações num espaço geográfico e, por meio disso, resulta em produto geoespaciais que demonstre a dinâmica da investigação abordada nesse método. Dessa forma, a utilização deste recurso foi aperfeiçoada por diversas pesquisas empíricas, que começaram com os pesquisadores de minas na África do Sul Krige e Sichel.

Segundo Grego et al. (2014), a geoestatística é um ramo da estatística que utiliza conceito de variáveis regionalizadas na avaliação de variabilidade espacial. Essas variáveis possuem características casuais e estruturadas, ou seja, podem assumir qualquer valor local, de acordo com uma função de probabilidade, e possuem uma estrutura que pode ser tratada por uma função espacial (Journel e Huijbregts, 1978).

O Camargo et al. (2004) informa que as amostras são valores representativos do fenômeno estudado, usualmente obtidas a partir de levantamento de campo, e que apresentam consistência de metodologia e unidade. Assim, essas amostragens podem ter aspectos diversos, como ambientais ou socioeconômicos, e estarem localizadas, como o exemplo da figura 11, que mostra uma dispersão de dados amostrais em uma determinada área.

Figura 11. Ilustração do processo de interpolação: amostras e o grid para determinação da superfície em cada retângulo.



Fonte: adaptado Camargo et al. 2004.

A geoestatística é uma análise composta por três métodos de modelos que orientam no tratamento de dados pontuais. Os métodos constituintes na geoestatística conforme o Camargo et al. (2004), são os apresentados a saber:

> I. Modelos determinísticos de efeitos locais: cada ponto da superfície é estimado apenas a partir da interpolação das amostras mais próximas, utilizando funções como inverso do quadrado da distância. A suposição implícita é que predominam os efeitos puramente locais. Neste caso, não é feita qualquer hipótese estatística sobre a variabilidade espacial.
> II. Modelos determinísticos de efeitos globais: a suposição implícita nesta classe de interpoladores é que, para a caracterização do fenômeno em estudo, predomina a variação em larga escala, e que a variabilidade local é irrelevante. Este é caso dos interpoladores por superfícies de tendência.
> III. Modelos estatísticos de efeitos locais e globais (krigagem): cada ponto da superfície é estimado apenas a partir da interpolação das amostras mais próximas, utilizando um estimador estatístico. Esses procedimentos requerem que a variação local e global seja modelada por modelos apresentados com um conjunto de parâmetros desconhecidos e outro de funções elementares, em geral, polinomiais. Esses estimadores apresentam propriedades de não ser tendenciosos e de procurar minimizar os erros inferenciais. Eles podem ser estimados via procedimentos como a krigagem universal e as funções intrínsecas de ordem k.

Segundo Alessi (2011), a estatística clássica apresenta modelos geralmente relacionados à verificação da distribuição de frequência dos dados; enquanto a geoestatística relaciona a interpretação da distribuição estatística, bem como a correlação espacial das amostras. A metodologia da geostática é fundamental para analisar informações relacionadas ao espaço geográfico e suas características, e o número de amostragem influencia na minimização de porcentagem de erro nos produtos resultantes dessa abordagem. Assim, a geoestatística não se limita a obter um modelo de dependência espacial, mas também estima pontos em locais que não foram coletados (Srivastava,1996; Goovaerts, 1997).

3.3. Krigagem

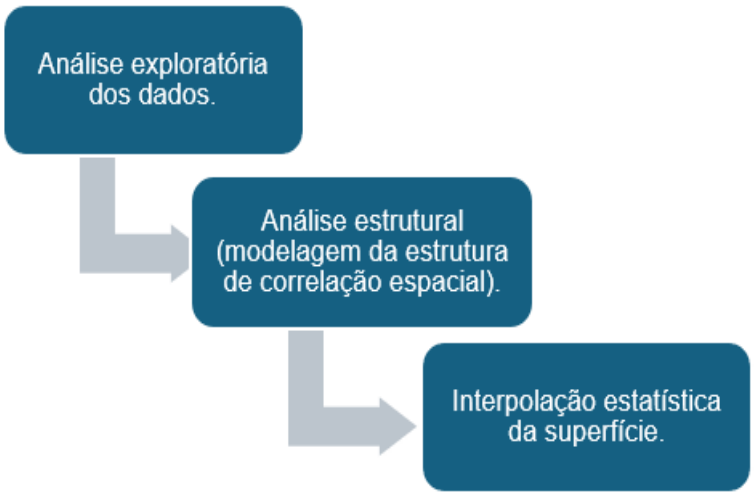
A krigagem consiste em um processo de estimativa por médias móveis, de valores de variáveis distribuídas no espaço a partir de valores adjacentes, enquanto considerados como interdependentes por uma função denominada variograma (Landim & Sturaro, 2002). A utilização dessa metodologia, segundo Camargo et al. (2004), foi desenvolvida para solucionar problemas de mapeamentos geológicos, porém foi expandida com sucesso para mapeamentos em outras áreas, tais como solos, hidrologia, atmosfera, entre outros. De acordo com Hengl (2009), o método usa variáveis que têm alguma continuidade ou variância espacial, o que permite que os dados obtidos por amostragem de pontos específicos sejam utilizados para parametrizar a estimativa de pontos, onde o valor da variável é desconhecido. Assim, a krigagem pode ser aplicada como algoritmo estimador nos modos descritos, a saber:

I. Previsão do valor pontual de uma variável regionalizada de uma determinada área no espaço geográfico, onde consiste no processo de interpolação exata dos dados observados e por meio de ferramentas computacionais resultar em base cartográfica com as informações de variável regionalizadas em uma área delimitada.

II. Cálculo médio de uma variável regionalizada é utilizado para volume mais amplo que o suporte geométrico, como na caracterização média de informações estratigráficas do solo obtidas por testemunho de sondagens.

A krigagem é uma sistemática que fornece valores estimados para a cobertura de regiões com ausência de dados, além disso, também apresenta o “erro” para esses valores apresentados na sua metodologia. Segundo Camargo et al. (2004), a metodologia da krigagem é composta pelas etapas apresentadas na figura 12.

Figura 12. Etapas constituintes na Krigagem



Fonte: Adaptado Camargo et al., 2004.

A figura apresenta a correlação das etapas para o desenvolvimento dessa sistemática, por meio disso é importante compreender por ser uma abordagem que envolve a espacialidade é necessário que todas as informações tenham um sistema coordenadas padronizados na mesma unidade. A análise da krigagem de acordo com Dias (2013), o variograma experimental ou variograma das amostras γ (h) é calculado pela diferença média quadrada entre os pares de dados pertencentes a uma determinada classe de distância, conforme expressa a Equação VI.

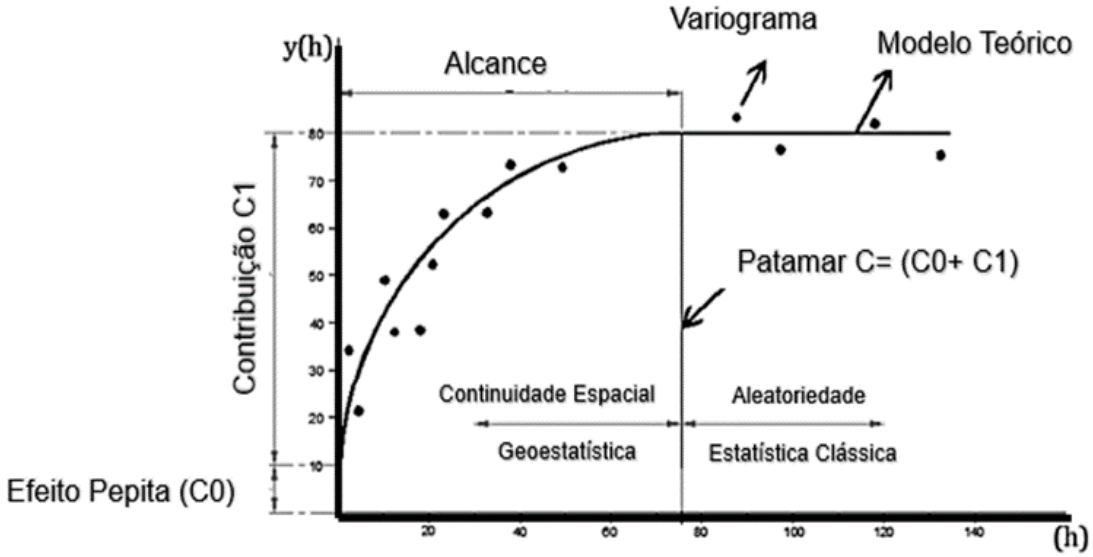
$$\gamma(\mathrm{h}) = \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(xi) - Z(xi+h)]^2 \quad \text{(equação VI)}$$

Logo as variáveis representativas na equação são:

$\gamma(\mathrm{h})$= variância experimental;
Z (xi) = valor da variável medida na posição xi;
Z (xi + h) = Valor da variável medida na posição x(i+h);
N = número de pares de dados para a distância de separação (h);
i = posição da amostra;
h = distância que separa duas amostras (m).

O variograma necessita de um modelo teórico que envolva os parâmetros de alcance, efeito pepita e patamar. Na figura 13 é possível compreender graficamente a relação desses parâmetros, modelo teórico e sua variância crescente com incremento da distância ao alcance de variações aleatórias.

Figura 13. Esquema de Variograma.



Fonte: Adaptado de Druck et al. (2004).

Na figura 13 são apresentados os parâmetros que compõe essa sistemática da krigagem, por meio disso é possível a correlação dos itens, a saber:

I. **Alcance -** Indica a distância onde as amostras não demostram relação espacial, por meio disso caracterizando uma relação aleatória. Logo, se uma amostra obtiver distância ao ponto e estiver estimada menor ou igual à amplitude, irá fornecer informações sobre o ponto.

II. **Patamar (C + Co) -** O valor que a função consegue estabilizar em relação à distância do alcance, demonstrando, dessa forma, a variabilidade máxima entre os pares de valores, como a variância dos dados e a covariância nula.

III. **Efeito Pepita -** Apresenta onde há existência de erro por motivos de ausência de dados ou intervalos pequenos para que as amostras consigam desenvolver o comportamento espacial relacionado ao fenômeno em estudo.

Segundo Landim e Sturaro (2002), os métodos de estimativas, comumente empregados, o método geoestatístico da krigagem pode ser considerado como o

melhor estimador linear sem viés, cujo objetivo é a minimização da variância da estimativa.

Quadro 6. Vantagem e desvantagens do uso da Krigagem.

Vantagens	Desvantagens
✓ Valores estimados baseiam-se no variograma; se for apropriado, fornece as seguintes informações: ✓ Parâmetros adequados de amostragem: número de amostras, distribuição e densidade; ✓ Parâmetros adequados de busca: tamanho da área de busca, forma (circular ou elipsoide) e, se elipsoide, orientação do eixo principal; ✓ Parâmetros adequados da grade: tamanho das células, forma e orientação; ✓ Natureza da distribuição espacial da variável investigada: uniformidade da distribuição, importância relativa da influência espacial x casual; ✓ Previsibilidade da variação espacial da variável avaliada; ✓ se o variograma for apropriado controla a krigagem, com as seguintes vantagens: ✓ evita ponderação arbitrária dos pontos amostrados; ✓ permite a determinação das melhores estimativas sem tendenciosidade: o melhor estimador é aquele que produz a melhor precisão (menor variância); ✓ permite o estabelecimento de limites de confiança, indicando se os resultados são aceitáveis e se a estratégia de amostragem deve ser modificada; ✓ precisão, contornos suaves, artefatos indesejáveis raros a não ser nas bordas do mapa; ✓ interpolador exato: os valores estimados para os nós das células, é	✓ O usuário pode não compreender o uso dos controles matemáticos e apesar disto, resultados são sempre obtidos; ✓ É necessário tempo para preparo do variograma e entendimento de geoestatística; ✓ Pode não ser possível a construção de um variograma adequado devido à natureza da variação espacial da variável analisada. Isto pode ocorrer devido à magnitude da amostragem e por erros analíticos; ✓ Requer longo tempo de computação para grupos de dados grandes ou complexos; Necessidade de software capacitado;

exatamente igual ao valor amostrado naquela posição; ✓ estima além dos limites máximo e mínimo dos valores dos pontos amostrados; ✓ modela tanto tendências regionais quanto anomalias locais; ✓ calcula variâncias dos pontos estimados(erros), que podem ser utilizadas para: ✓ quantificar um intervalo de valores (±) para os pontos estimados, definindo estimativas realistas; ✓ Calcular intervalos de confiança para verificar a probabilidade de os valores ocorrerem num intervalo de ± 2 unidades de desvio padrão da média; variâncias mapeadas podem indicar locais para adensamento da amostragem.	
Quando usar	**Quando não usar**
✓ Estiverem presentes tanto tendências regionais quanto anomalias locais; ✓ Anomalia local não presente em toda a área, por ex. em ambiente fluvial; ✓ Quiser estimar com base em uma média global; ✓ Tiver dados irregularmente amostrados ou agrupados (*clustered*).	✓ Menos de 30 pontos amostrados: número insuficiente de pares para modelar o variograma; ✓ Valores discrepantes de Z: removê-los antecipadamente; ✓ Erro grande e inexplicado (efeito pepita pronunciado) *. ✓ Amostras de populações Diversas

Fonte: Landim (2000).

3.4. Método de Análise Hierárquica – AHP

O AHP consiste em uma metodologia de Auxílio Multicritério à Decisão (AMD) que tem por objetivo a escolha de alternativas, considerando-se diferentes critérios e subcritérios qualitativos e quantitativos (Eduardo et al., 2014). Nas atividades de planejamento urbano, é necessário compreender inúmeras variáveis para resultar em modelos que apresentam a dinâmica do objeto de análise abordado. Partindo dessa premissa o recurso dos métodos multicritérios é principalmente devido à importância e agilidade em promover resultados mais específicos, de qualidade e indicados para

problemas de ordenamento territorial (uso da terra, vegetação, geologia, geomorfologia, demografia e entre outros), que possibilitam cenários de crescimento futuro, (Zambon et al., 2005; Pisani; Alves, 2018).

A AHP leva em conta dados, experiências, percepções e intuições de uma maneira lógica e completa, permitindo a realização de escalas de prioridades ou de pesos (Pinese Júnior, 2010). Desse modo, Saaty (1980) descreve valores de 1 a 9 relacionando-os com o grau de importância de uma variável em relação à outra e par a par entre os critérios, a partir da matriz dos elementos estabelecida para a modelagem do fenômeno (Santos et al*.,* 2010), conforme a tabela 4.

Tabela 4. Hierarquização dos valores de importância de uma variável no AHP.

VALORES	**IMPORTÂNCIA MÚTUA**
1/9	Extremamente menos importante que
1/7	Muito fortemente menos importante que
1/5	Fortemente menos importante que
1/3	Moderadamente menos importante que
1	Igualmente importante a
3	Moderadamente mais importante que
5	Fortemente mais importante que
7	Muito fortemente mais importante que
9	Extremamente mais importante que

Fonte: Saaty (1980) e Santos et al. (2010).

A hierarquização orienta que o elemento com maior relevância na comparação é utilizado com um valor inteiro na escala, desse modo, o de menor importância é o inverso da unidade. Desta forma, ao analisar multivariáveis, esses valores dos dados coletados compõem a modelagem de uma matriz conforme a figura 14.

Figura 14. Matriz de análise multivariável AHP.

Matriz A

Iluminação	A	B	C	D
A	1	5	6	7
B	1/5	1	4	6
C	1/6	1/4	1	4
D	1/7	1/6	1/4	1

Fonte: Saaty, 1994.

A modelagem matricial apresenta uma correlação entre os fatores linha e colunas que em análise são estabelecidos valores iguais a seu grau de relevância definidos pela tabela 9 conforme os julgamentos do método AHP. De acordo com Chan (2004), a metodologia para aplicação do AHP pode ser caracterizada nos itens no quadro 7.

Quadro 7. Matriz de análise multivariável AHP.

Item	Procedimento
1	Definir o problema e o que se procura saber. Expor as suposições refletidas na definição do problema, identificar partes envolvidas, checar como estas definem o problema e suas formas de participação no AHP.
2	Decompor o problema desestruturado em hierarquias sistemáticas, do topo (objetivo geral) para o último nível (fatores mais específicos, usualmente as alternativas). Caminhando do topo para a extremidade, a estrutura do AHP contém objetivos, critérios (parâmetros de avaliação) e classificação de alternativas (medição da adequação da solução para o critério). Cada nó é dividido em níveis apropriados de detalhes. Quanto mais critérios, menos importante cada critério individual se torna, e a compensação é feita pela atribuição de pesos para cada critério. É importante certificar-se de que os níveis estejam consistentes internamente e completos, e que as relações entre os níveis estejam claras.
3	Construir uma matriz de comparação paritária entre os elementos do nível inferior e os do nível imediatamente acima. Em hierarquias simples, cada elemento de nível inferior afeta todos os elementos do nível superior. Em outras hierarquias, elementos de nível inferior afetam somente alguns elementos do nível superior, requerendo a construção de matrizes únicas.
4	Fazer os julgamentos para completar as matrizes. Para isso, são necessários n (n - 1) /2 julgamentos para uma matriz n x n, sendo "n" o número de linhas e colunas. O analista ou grupo participante julga se A domina o elemento B. Se afirmativo, inserir o número na célula da linha de A com a coluna de B. A posição coluna A com linha B terá o valor recíproco. Assim, prossegue-se o preenchimento da matriz. Os valores inseridos são aqueles da escala de comparação, mostrados na tabela 1.
5	Calcular o índice de consistência (IC). Se não for satisfatório, refazer julgamentos. I.C.= Índice de Consistência = $\frac{\lambda_{máx}-\mathrm{n}}{n-1}$(equação VII)

Fonte: Adaptado Chan (2004).

Ao analisar os procedimentos apresentados no quadro 7 no item 5 onde é demostrado equação VII para analisar o Índice de consistência é possível verificar outras equações de apoio nesta abordagem como a Razão de Consistência (RC) definida pelo Índice de Consistência (IC) e do índice Aleatório (RI - Random Index) na equação VIII.

$$\mathrm{RC} = \frac{IC}{RI} \quad \text{(Equação VIII)}$$

Logo, se os valores de RC<0,1, a matriz é considerada consistente, caso contrário necessita ser retificada. Consequentemente, o valor de 0,1 de RI é calculado empiricamente. Logo, Satty (1991) apresenta que a matriz é consistente ao modo que o autovalor ≥ n, sendo desse modo os índices aleatórios (RI) validados conforme o número de critérios (n) apresentados na tabela 5.

Tabela 5. Índice Randômico Médio do AHP.

n	RI
1	0
2	0
3	0,52
4	0,89
5	1,11
6	1,25
7	1,35
8	1,4
9	1,45
10	1,49

Fonte: Saaty (1991).

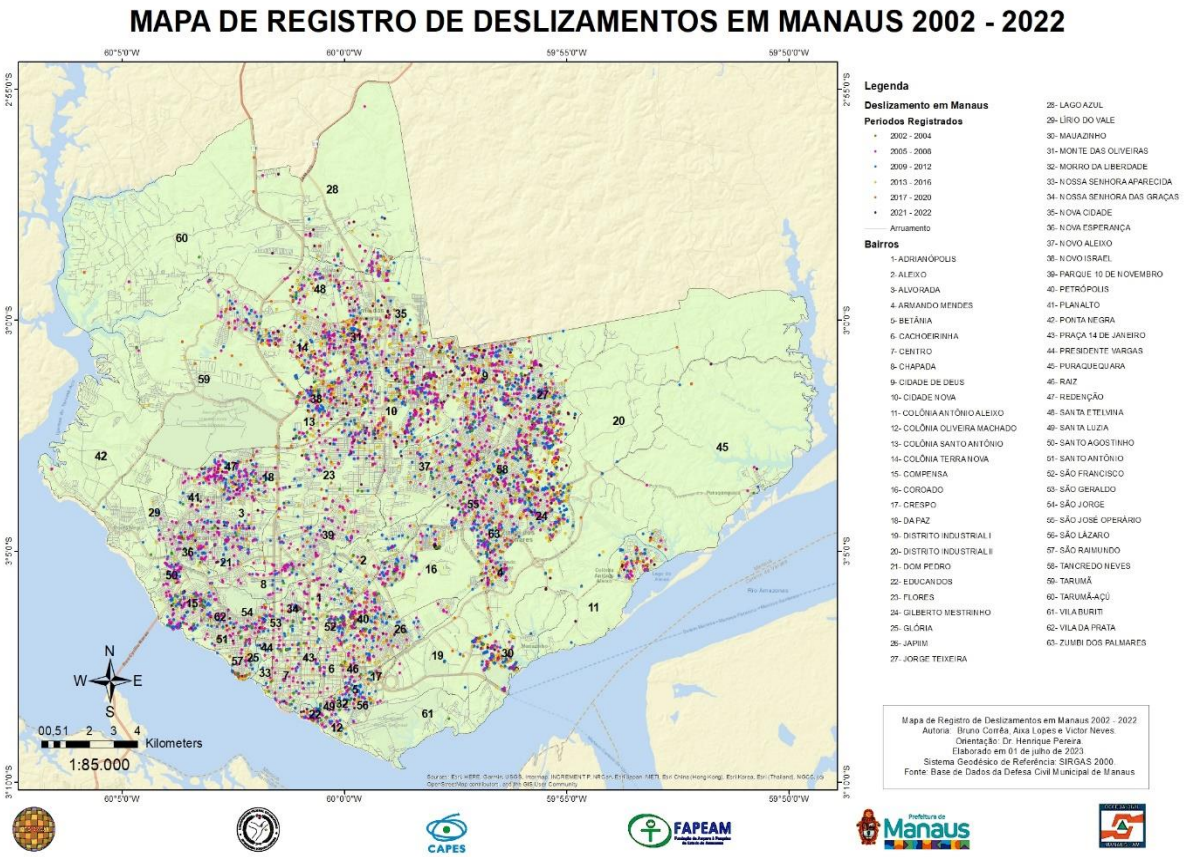
Assim, a abordagem do Método da Análise Hierárquica (AHP), em conjunto com as metodologias de geoprocessamento abordadas nesse capítulo, irão compor um modelo que viabilize por meio dos parâmetros coletados as suscetíveis áreas de vulnerabilidade a deslizamento em Manaus. Esse tipo de análise pode ser usado em modelos de gestão ambiental, o que ajuda a escolher e implementar o modelo. Ele também mostra como testar o modelo.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1. Caracterização dos Deslizamentos Urbanos de Manaus

A investigação dos registros de casos de deslizamentos urbanos em Manaus foi desenvolvida em parceria com a Defesa Civil Municipal, que apresentou as informações registradas no SISDEC (Sistema Defesa Civil). A análise foi limitada no período de 2002 a 2022, e apresentou a distribuição demonstrada na figura 15.

Figura 15. Mapa de registro de deslizamentos urbanos em Manaus no período de 2002 a 2022.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A cronologia da caracterização do período em análise no estudo se baseou na disponibilidade de informações apresentadas no SISDEC, que por se tratar de um banco de registro, necessitou uma verificação nos endereços constituintes no acervo de informações sobre deslizamentos em Manaus. No processo de georreferenciamento dessas informações, necessitou do recurso de busca de

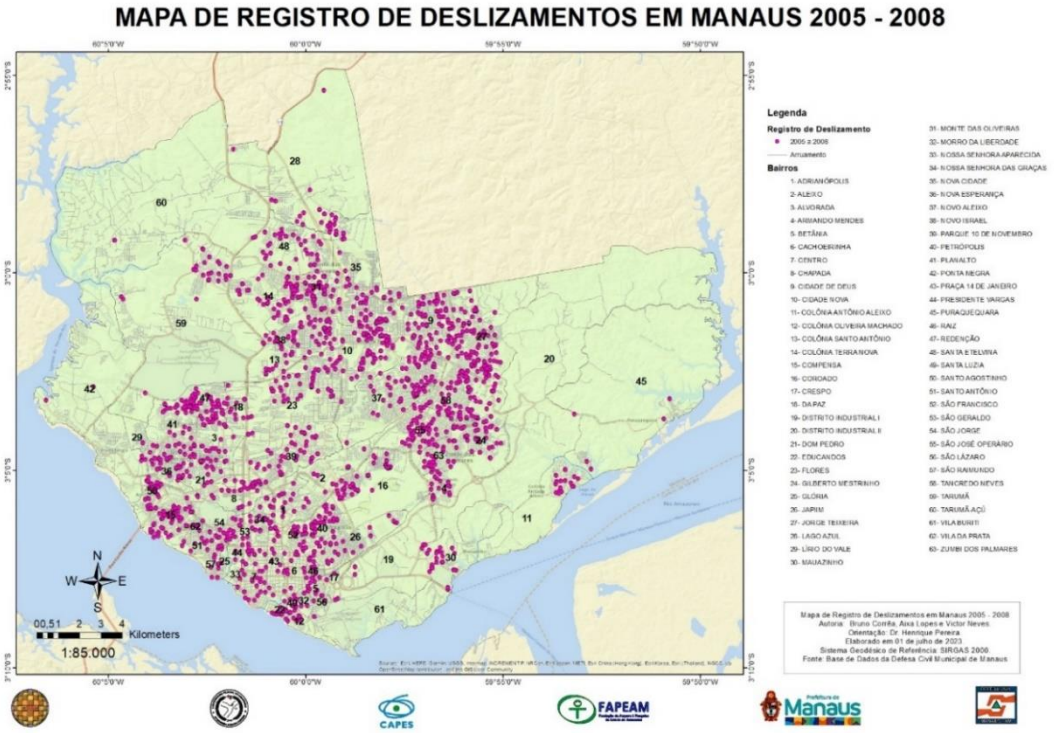
endereços no *Google Earth*, no qual a ferramenta otimizou a localização dos registros. Entretanto, é importante compreender que ao longo da cronologia algumas localizações foram perdidas pela ausência de dados ou mudança na nomenclatura das ruas.

Posteriormente, a espacialização dos registros de deslizamentos foi segmentada pelo período de quadriênio correlacionado com o período de Gestão Municipal nas figuras 16 a 21. A sistemática de agrupar anos é perceber ao longo dos anos como estão sendo as ocorrências dos fenômenos de deslizamentos urbanos e quais zonas com maior número de registros. Nessa análise, também foi possível compreender que na cronologia o espaço urbano sofreu expansão nos perímetros habitados. Dessa forma, o aumento de deslizamentos pode ter aumentado, uma vez que áreas de risco começaram a ser habitadas.

Figura 16. Mapa de registro de deslizamentos urbanos em Manaus no período de 2002 a 2004.

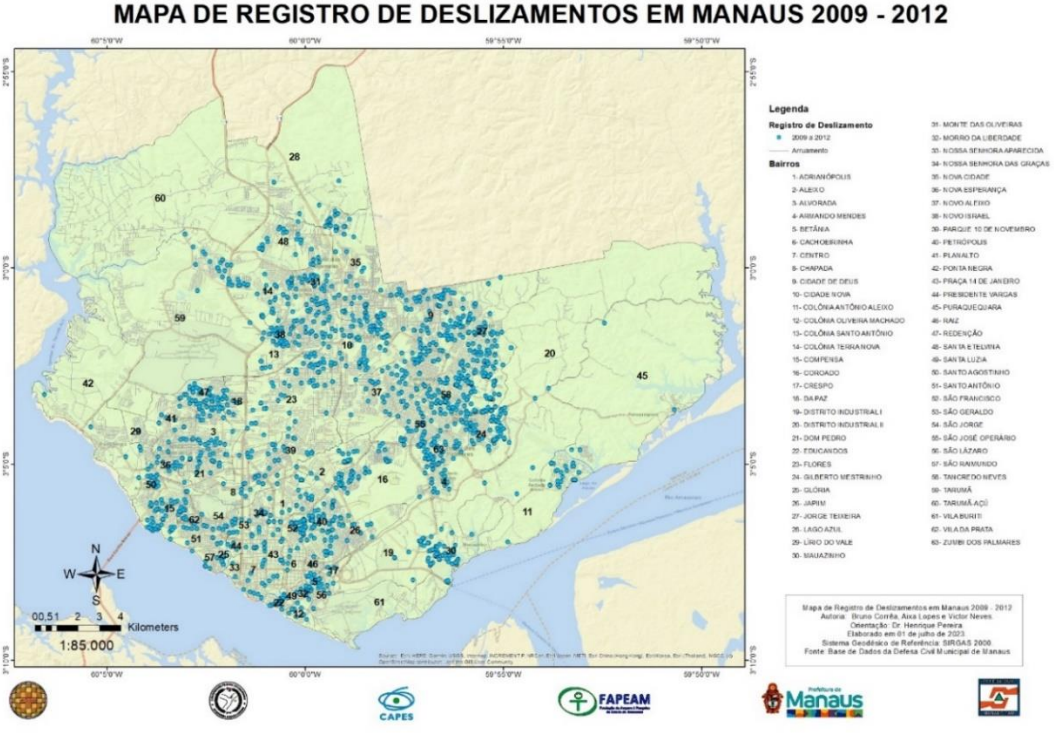
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 17. Mapa de registro de deslizamentos urbanos em Manaus no período de 2005 a 2008.



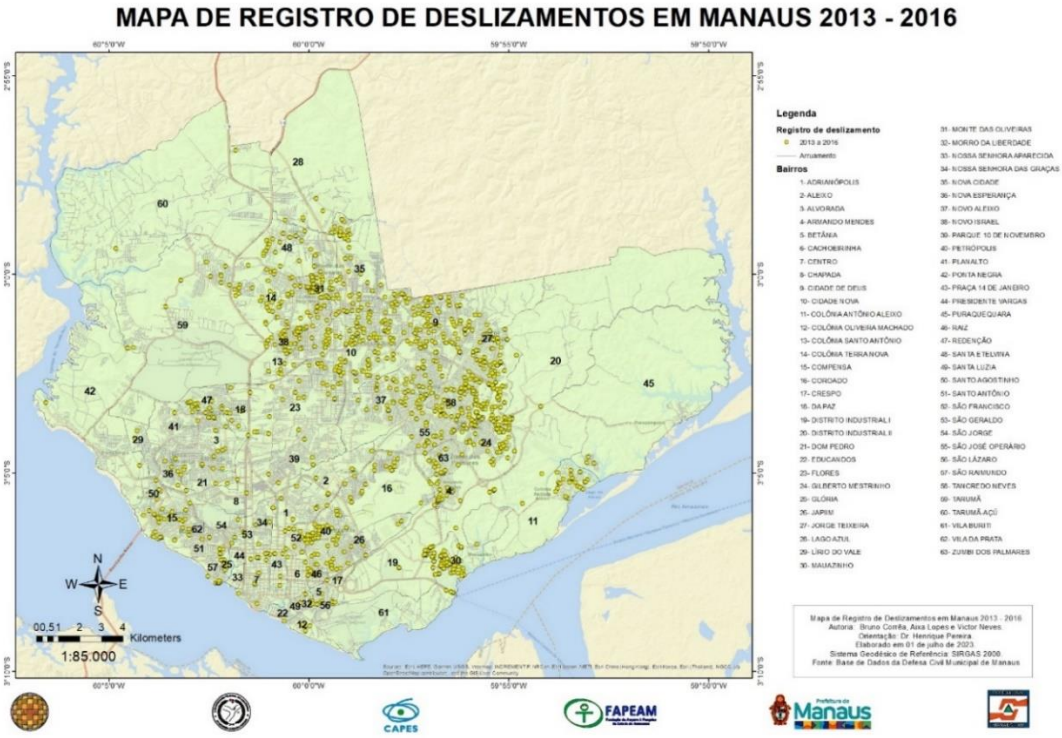
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 18. Mapa de registro de deslizamentos urbanos em Manaus no período de 2009 a 2012.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 19. Mapa de registro de deslizamentos urbanos em Manaus no período de 2013 a 2016.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 20. Mapa de registro de deslizamentos urbanos em Manaus no período de 2017 a 2020.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 21. Mapa de registro de deslizamentos urbanos em Manaus no período de 2021 a 2022.

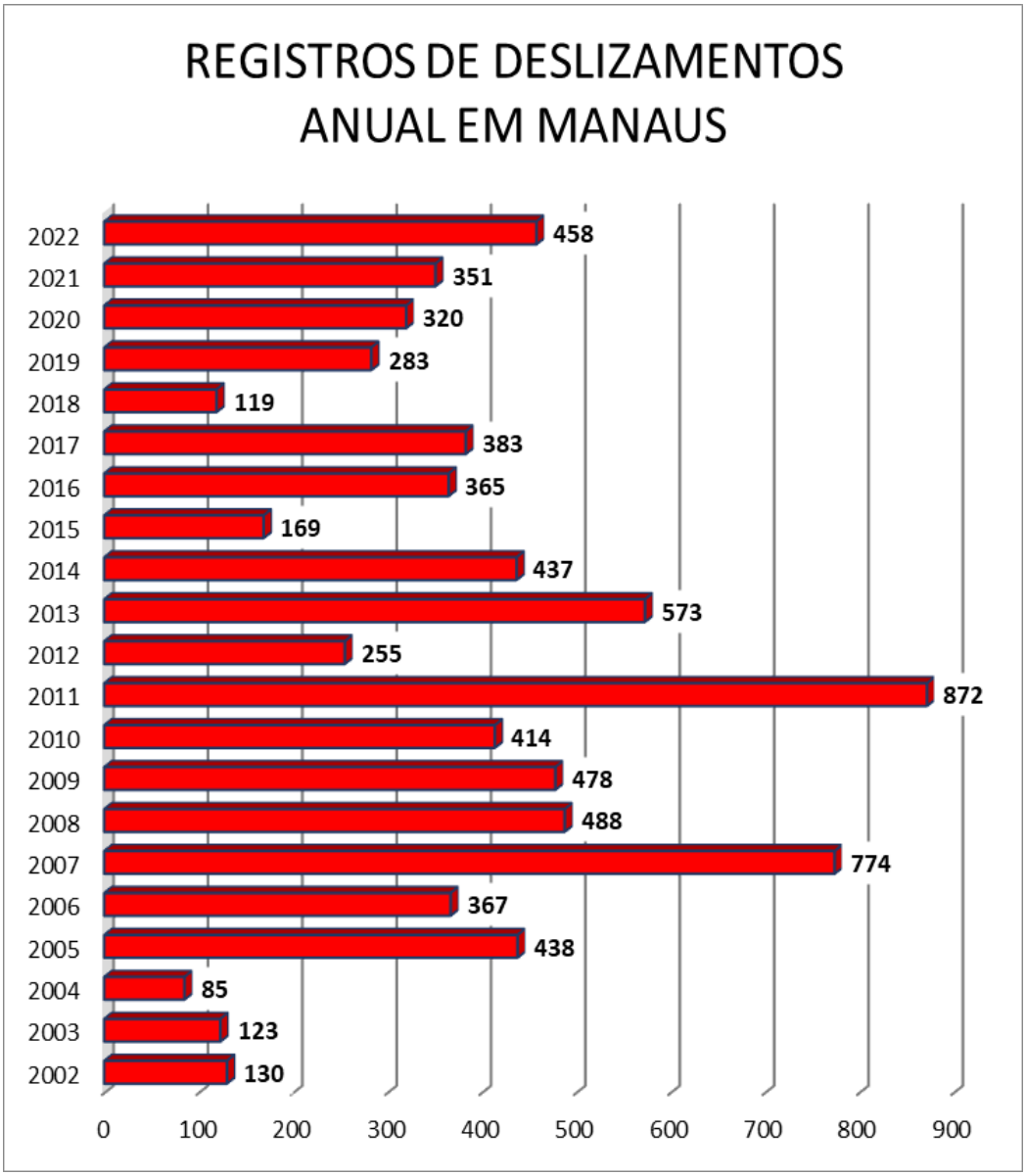
Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao analisarmos os mapas por quadriênio, percebemos que, na evolução, o número de deslizamentos urbanos foi se expandindo de modo significativo, especialmente na zona leste da cidade, enquanto houve redução na região centro-sul. O que salienta a importância da investigação de método que possibilite simular quais regiões possuem risco. A proposta de entender essas zonas de vulnerabilidade pode auxiliar na gestão de controle de expansão urbana, em virtude de esse crescimento em Manaus ainda não ser planejado e ocorre por meio de invasões na sociedade manauara.

Na figura 22, é possível notar que os números anuais dos registros de deslizamentos em Manaus indicam que o ano com menor número de ocorrências de desastres causados por massas foi 2004. Porém, em 2011, a manifestação desse fenômeno natural chegou a 872 registros. Entretanto, mesmo que haja uma variação significativa entre o mínimo e o máximo registros de deslizamentos, estima-se uma média de 375 casos por ano, em Manaus. Essa informação é bastante útil para que, nos planejamentos de orçamentos, sejam elaborados um quantitativo de verba que

atenda essa média de ocorrências. Assim, elaborando proposta de mecanismo de resiliência na solução dessa problemática urbana e ambiental.

Figura 22. Registro de deslizamentos urbanos em Manaus no período de 2002 a 2022



Fonte: Elaborado pelo autor.

Partindo dos casos georreferenciados, foi possível analisar os bairros com maior incidência de registros de movimentação de massas na cidade de Manaus. Com a análise delimitada por bairros, é possível correlacionar a existência dos casos nessas regiões com dados dos outros fatores a serem abordados na modelagem.

Desse modo, possibilitando pontos amostrais que tenham precisão de informações de amostras para elaborar uma hierarquização consistente dos fatores a zonas de risco de deslizamento. A tabela 6 classifica os 20 bairros com maior incidência de registros ao longo da série de 2002 a 2022.

Tabela 6. Registro de deslizamentos urbanos em bairros de Manaus no período de 2002 a 2022.

Ordem	Bairro	N.º de deslizamentos	Área (ha)	Densidade de Deslizamento
1º	Cidade Nova	2002	1419,38	141,05
2º	Jorge Teixeira	697	1557,15	44,76
3º	Mauazinho	485	748,83	64,77
4º	Colônia Terra Nova	391	943,98	41,42
5º	São José Operário	377	543,10	69,42
6º	Tancredo Neves	304	304,64	99,79
7º	Expansão do Distrito Industrial	278	553,18	50,25
8º	Petrópolis	244	324,10	75,29
9º	Redenção	227	300,16	75,63
10º	Santa Etelvina	222	669,45	33,16
11º	Monte das Oliveiras	214	401,92	53,24
12º	Compensa	184	508,27	36,20
13º	Novo Israel	171	140,14	122,02
14º	Zumbi dos Palmares	145	251,05	57,76
15º	Armando Mendes	142	307,65	46,16
16º	Distrito Industrial II	142	5137,69	2,76
17º	São Francisco	107	162,28	65,94
18º	Colônia Antônio Aleixo	102	923,82	11,04
19º	Japiim	97	547,63	17,71
20º	Educandos	93	82,83	112,28

Fonte: Elaborado pelo autor.

A tabela 6 caracteriza apenas 20 bairros pertencentes ao quantitativo total de 63 existentes na região urbana de Manaus. Porém, ao medir a área afetada pelas Ocorrências de Deslizamento em Manaus, é possível ver que a Cidade Nova, Novo Israel e Educandos são os bairros mais afetados. Consequentemente, a área urbana de Manaus é de 427 km², na investigação do estudo é possível verificar os deslizamentos segundo a divisão administrativa municipal. Na figura 23 apresenta-se o Percentual por zona urbana de casos de movimentos de massa no período de 2002 a 2022.

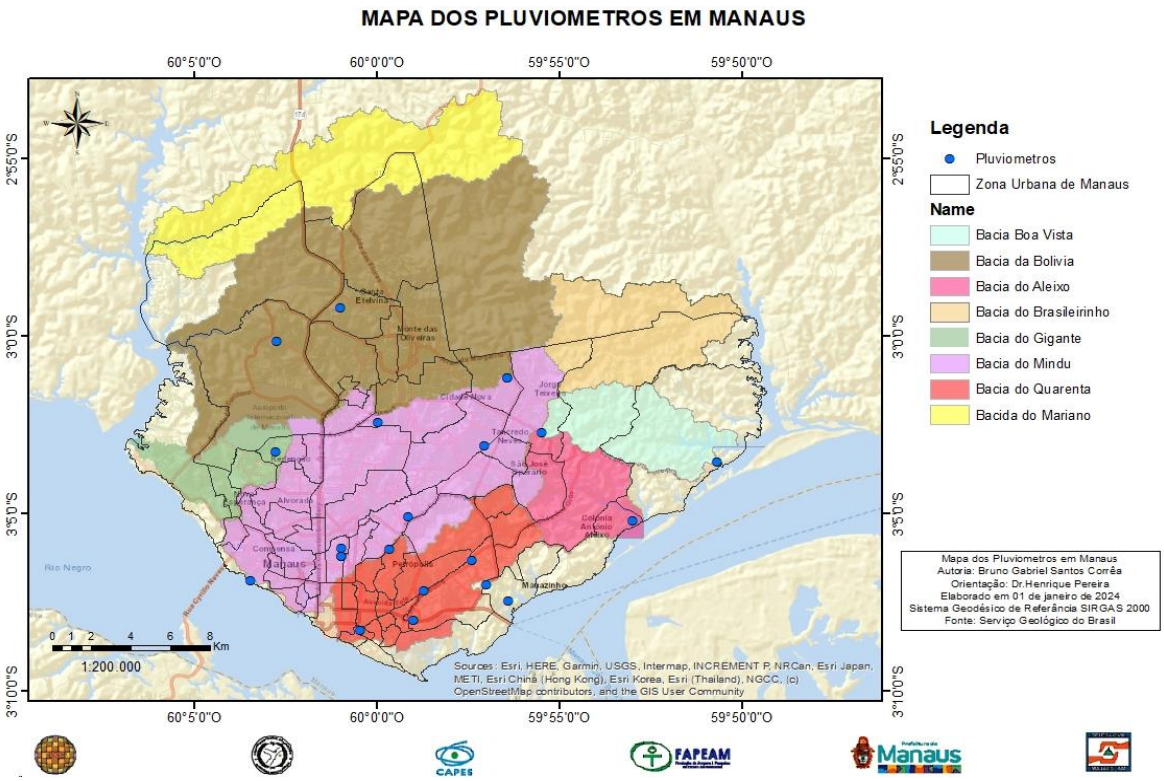
Figura 23. Registro de deslizamentos urbanos em Manaus nas Zonas Administrativas no período de 2002 a 2022.

Fonte: Elaborado pelo autor.

6.2. Análise Pluviométrica Interanual de Manaus

Os dados de pluviometria considerados estudo foram tabulados em termos de precipitação acumulada diária. Os pluviômetros usados como referências para as amostragens estão apresentados na figura 24. O quantitativo de pluviômetros existentes na região são 24, sendo pertencentes às instituições do Cemaden, ANA, SGB e INMET.

Figura 24. Mapa de pluviômetros de Manaus.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na série cronológica estabelecida no estudo, apenas três estações apresentam dados de pluviometria diária com poucas falhas de informações. A análise então busca sistematizar, por meio da tabulagem, os dados disponibilizados para que na investigação da análise hierárquica consiga obter zonas com informações mais precisas do local investigado, por meio disso caracterizando pesos adequados aos fatores da modelagem. Partindo dessa perspectiva, o levantamento dos períodos de informações de dados de cada estação pluviométrica está apresentado na tabela 7.

Tabela 7. Registro de dados pluviométricos em Manaus no período de 2002 a 2022.

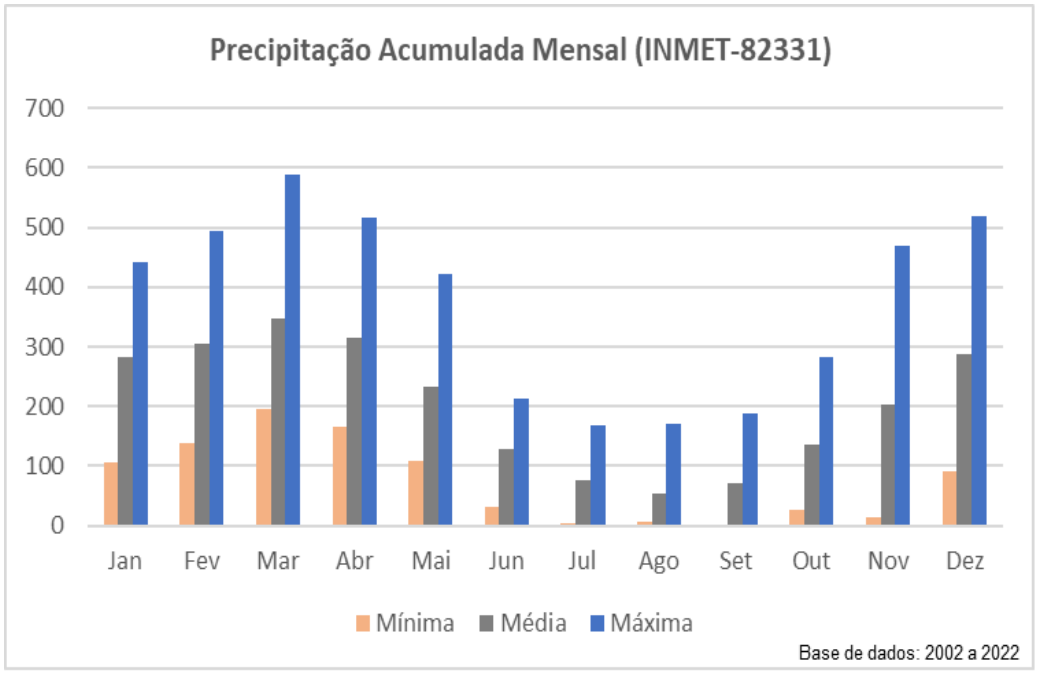
Instituição	Estação	Período (mês/ano)
ANA	00360000	01/2002 - 06/2019
ANA e SGB	00359005	01/2002 - 12/2022
ANA	00359007	02/2007 - 05/2016
INMET	82331	01/2002 - 12/2022
INMET	A0101	01/2002 - 12/2022
CEMADEN	Igarapé do Quarenta	10/2016 - 12/2022
CEMADEN	Igarapé do Mindu	10/2016 - 12/2022
CEMADEN	MANAUS	08/2018 - 10/2018
CEMADEN	Cidade de Deus	09/2018 - 12/2022
CEMADEN	Bairro da União	09/2018 - 12/2022

CEMADEN	Santa Etelvina	09/2018 - 12/2022
CEMADEN	Redenção	09/2018 - 12/2022
CEMADEN	Puraquequara	09/2018 - 12/2022
CEMADEN	Mauazinho	09/2018 - 12/2022
CEMADEN	Flores	09/2018 - 12/2022
CEMADEN	Compensa	09/2018 - 12/2022
CEMADEN	Colônia Antônio Aleixo	01/2022 - 12/2022
CEMADEN	Tarumã	11/2018 - 12/2022
CEMADEN	Santa Luzia	11/2018 - 12/2022
CEMADEN	Jorge Teixeira	11/2018 - 12/2022
CEMADEN	Coroado	11/2018 - 07/2022

Fonte: Elaborado pelo autor.

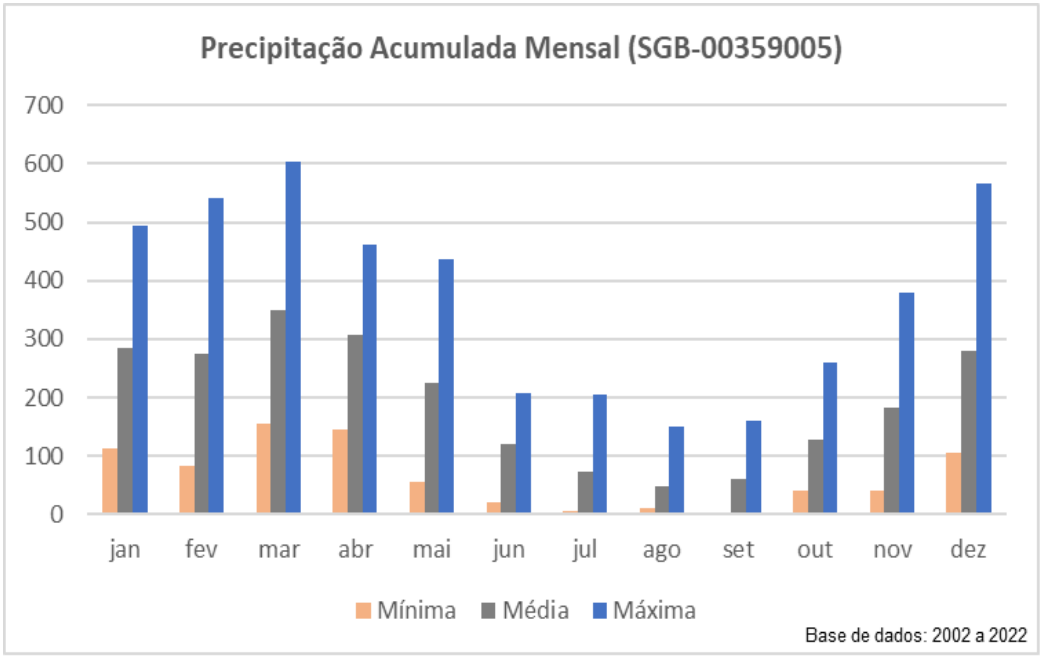
Ao observarmos os períodos da análise, foi possível compreender que a expansão de dados pluviométricos na região de Manaus ocorreu em 2018 com a colaboração do CEMADEN. A importância da espacialidade das coletas pluviométricas é fundamental para se obter valores precisos de precipitação in loco e correlacionar a intensidade de precipitação nas zonas de deslizamentos. Nas figuras 25 a 27 apresentam-se os valores interanuais mensais das estações 00359005, 82331 e A0101.

Figura 25. Precipitação mensal interanual da estação (8233) de 2002 a 2022.



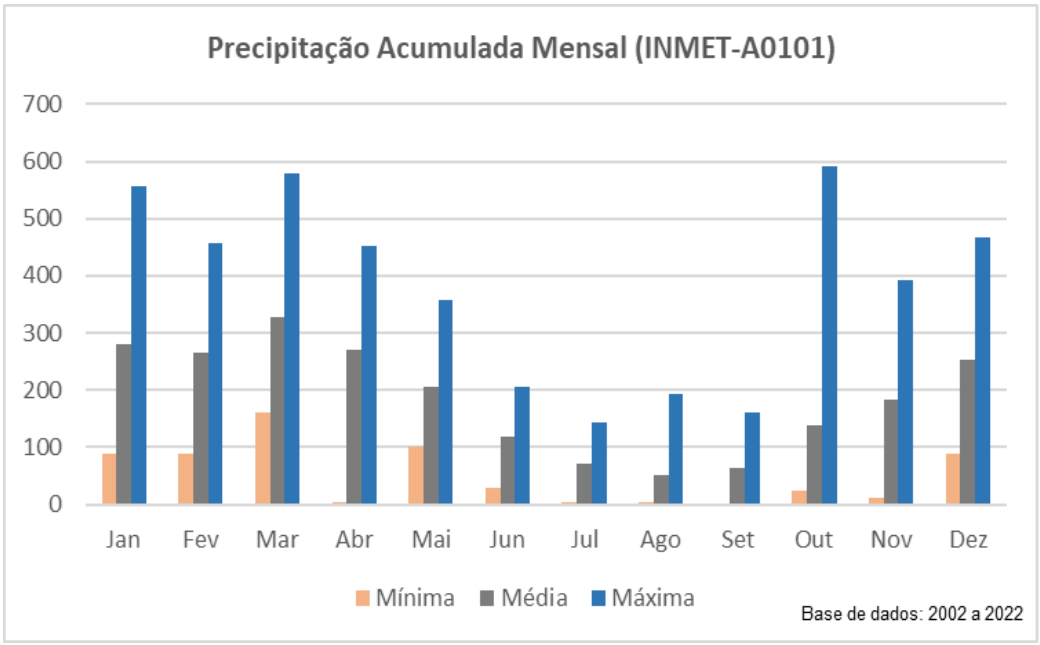
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 26. Precipitação mensal interanual da estação (00359005) de 2002 a 2022.



Fonte: Elaborado pelo autor.

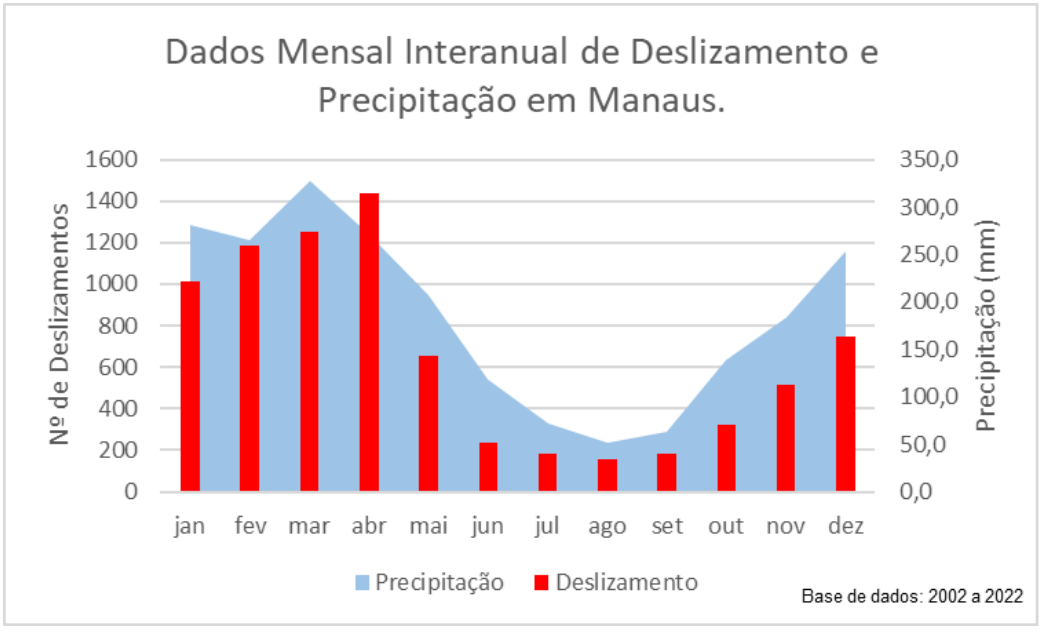
Figura 27. Precipitação mensal interanual da estação (a0101) de 2002 a 2022.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao analisarmos os gráficos, compreendemos que o período de outubro a maio é onde ocorrem os maiores volumes de precipitações na região de Manaus. Nesse período, a precipitação alcança valores significativos de máximas nos meses de fevereiro, março e abril. Entretanto, é possível ressaltar que essas estações se localizam em regiões próximas à confluência do bairro Aleixo e Adrianópolis, desse modo percebemos valores com pequenas divergências nas estações convencionais que são a 00359005 e a 82331. A figura 27 apresenta uma precipitação na estação A0101 com valores de máximas nos meses de janeiro, outubro que correlacionado a estação 82331 mostra uma diferença significativa, sendo que elas estão localizadas na mesma região, porém pelas médias nos gráficos é perceptível que as informações estão dentro dos parâmetros de consistência do dado. Assim, os dados de média mensal da estação A0101 e o número de registros de deslizamentos são correlacionados na figura 28.

Figura 28. Série mensal de deslizamentos e precipitação em Manaus.

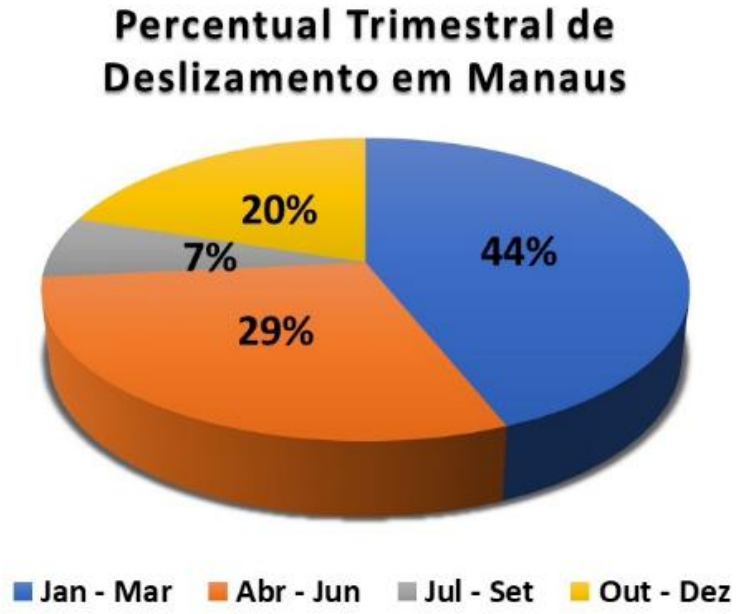


Fonte: Elaborado pelo autor.

A figura 28, as colunas mostram o somatório mensal dos deslizamentos relacionados com a média de precipitação acumulada no período de 2002 a 2022. Na análise de correlação, é perceptível que a contribuição da precipitação no deslizamento de terras em Manaus é totalmente significativa. Por meio disso, são poucos os registros com respostas de movimentação de terras fora do período de precipitação. A correlação é observada pelo sincronismo de comportamento entre as

médias de ocorrências e precipitação, que tendem a ter níveis altos no período do inverno na região e baixos para o verão amazônico. Assim, a figura 29 apresenta o percentual trimestral de deslizamento em Manaus.

Figura 29. Percentual trimestral de deslizamentos em Manaus no período de 2000 a 2022.



Fonte: Elaborado pelo autor.

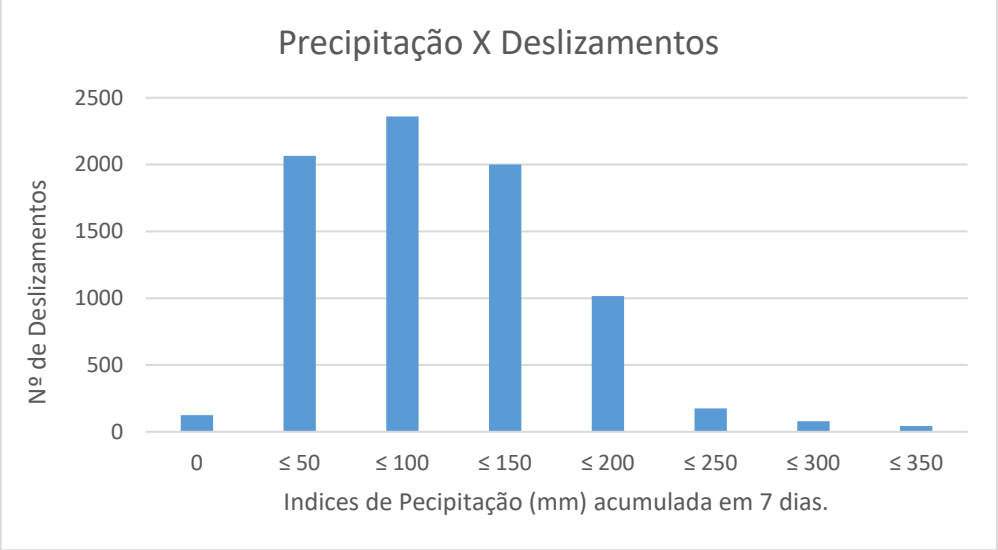
Na figura 29 é possível entender que os maiores índices de deslizamentos urbanos ocorrem no período climático de inverno delimitado pelo primeiro de semestre, que contabilizou cerca de 73% de manifestação desse tipo de desastres em 22 anos de registros.

6.3. Análise comparativa dos parâmetros x deslizamentos em Manaus

A investigação sobre o movimento de massas consistiu em se prospectar as informações necessárias baseadas em alguns modelos de geoprocessamento em análise de riscos a deslizamento como o método do SHALSTAB e SINMAP que utiliza como parâmetros o uso do solo, declividade, precipitação, coesão do solo, ângulo de atrito do solo e direção de escoamento. O estudo usou o Método de Análise Hierárquica – AHP para medir a resistência do solo usando Sondagem a Percussão (SPT), coesão do solo, ângulo de atrito do Solo, Peso específico do Solo, Uso e Ocupação, Direção de Fluxo, Densidade Populacional e Precipitação Acumulada em

7 dias. A figura 30 representa a correlação das ocorrências de deslizamentos e o índice pluviométrico acumulado de 7 dias.

Figura 30. Relação da Precipitação Acumulada x Ocorrências de Deslizamentos em Manaus.



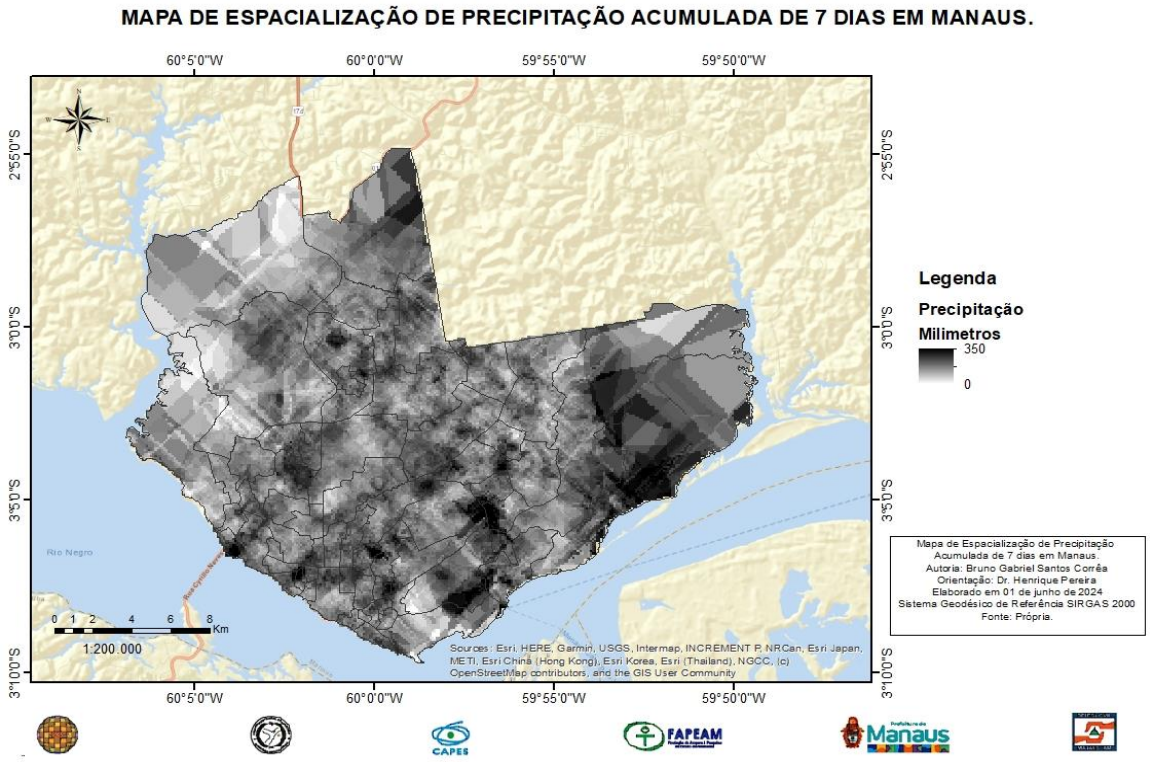
Fonte: Elaborado pelo autor.

A figura 30 demostra que as precipitações acumuladas até 150 mm são a faixa de maior impacto a fenômenos de movimentação de terra. A relação das informações apresentadas no gráfico fomentou a espacialização de dados pontuais de precipitação acumuladas existentes na área urbana de Manaus. Portanto, os dados de precipitação se basearam somente na estação do INMET em virtude de a cronologia existente ser adequada ao período de ocorrências a deslizamentos registrados de 2002 a 2022. A geoespacialização desses pontos de ocorrências com índices pluviométricos acumulados formularam, por meio da krigagem o *raster* de pluviometria para o Método de Análise Hierárquica conforme a figura 31. A krigagem das informações pluviométricas na figura 31 apresenta o mapeamento de zonas críticas de índices pluviais direcionadas ao deslizamento.

A segunda fonte para a elaboração dos fatores de Uso e Ocupação, Declividade e Direção de Fluxo são desenvolvidas por imagens de satélites disponibilizadas pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. Os fatores produzidos por meio das imagens de satélite são parâmetros ambientais técnicos que caracterizam a superfície de análise a esse fenômeno. A figura 32 é contabilizado o número de registros de ocorrências de deslizamentos em Manaus existentes para as

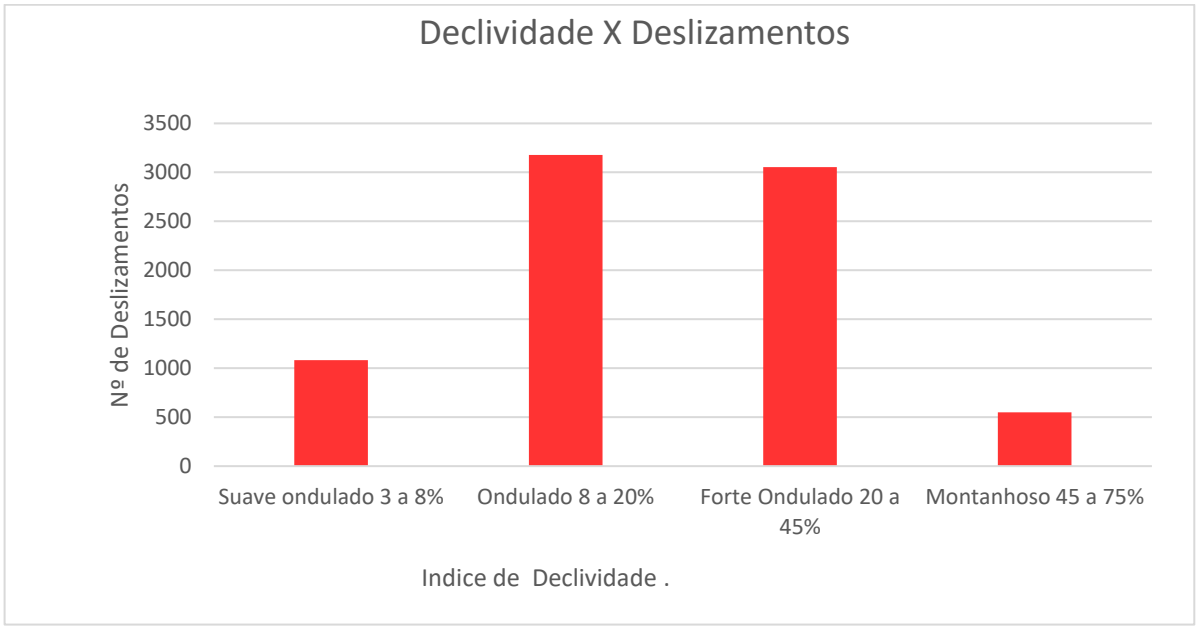
classes de declividade definida segundo a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa.

Figura 31. Mapa de espacialização de precipitação Acumulada de 7 dias em Manaus.



Fonte: Elaborado pelo autor.

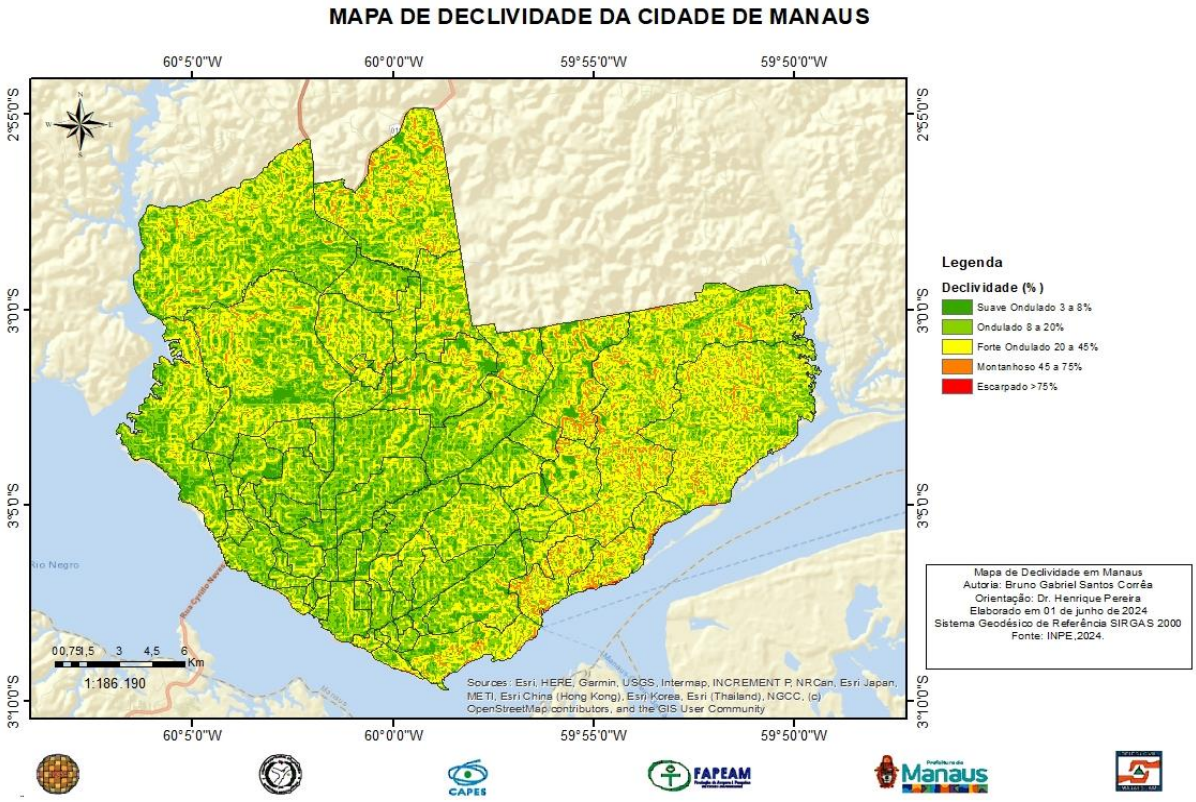
Figura 32. Relação da declividade com as ocorrências de deslizamento em Manaus.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A classificação de zonas com 8 a 45% de declividade são especificações com maior relevância a incidência de ocorrências a deslizamentos em Manaus. A importância dessa investigação para a caracterização dos movimentos de massa é uma das principais análises, pois em virtude de que o fenômeno de deslizamento ocorre em zonas que apresentam uma diferença de elevação na declividade. A figura 33 apresenta a distribuição das classes de declive local em Manaus. Por meio da geoespacialização desses dados se destaca que grande parte da região de Manaus se estabelece em faixa de forte ondulado compreendendo 20 a 45% de declividade.

Figura 33. Mapa de declividade da cidade de Manaus.



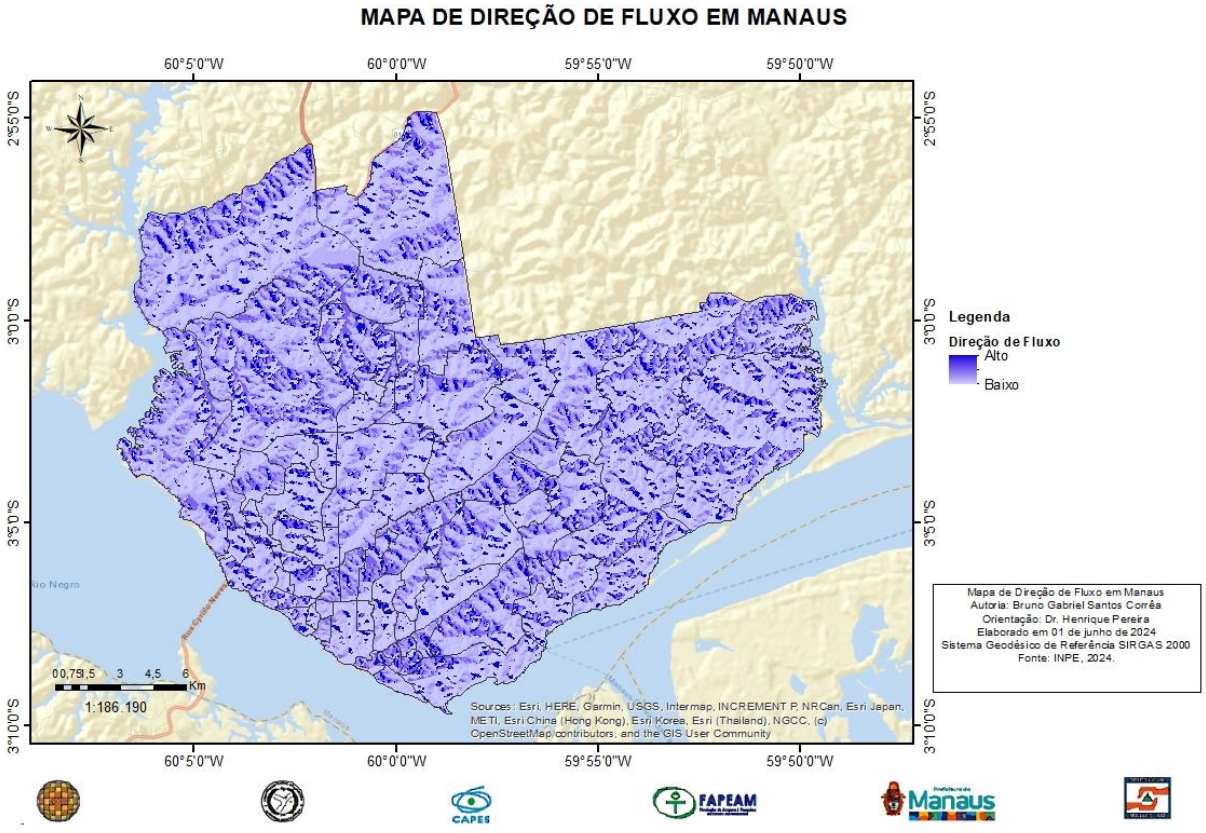
Fonte: Elaborado pelo autor.

A figura 33 também apresenta um quantitativo representativo em relação ao espaço urbano de Manaus, com fragmentos com declividade superior a 45%, o que pela declividade já apresenta uma zona de fragilidade à segurança da sociedade nessa área. Outra grande importância a ser compreendida é que essas áreas mais concentradas com fragmentos de declividades montanhosas a escarpadas estão situadas na Zona Leste da cidade, onde está situada uma grande parte populacional

com baixo poder de capital financeiro. A importância de compreender a dinâmica da declividade permite a reflexão que, na ausência de um planejamento de expansão adequado para essa região com poucos mecanismos de infraestrutura, venha resultar no futuro índices elevados de ocorrência.

A declividade também é uma variável que por meio de modelagem de ferramenta “*Flow Direct”* de geoprocessamento pode gerar uma imagem raster por meio de valores de uma matriz dos *pixels.* Assim é possível verificar o direcionamento do fluxo hídrico na superfície. A figura 34 apresenta o direcionamento do fluxo hídrico na superfície em Manaus.

Figura 34. Mapa de fluxo de direção de escoamento hídrico de Manaus.

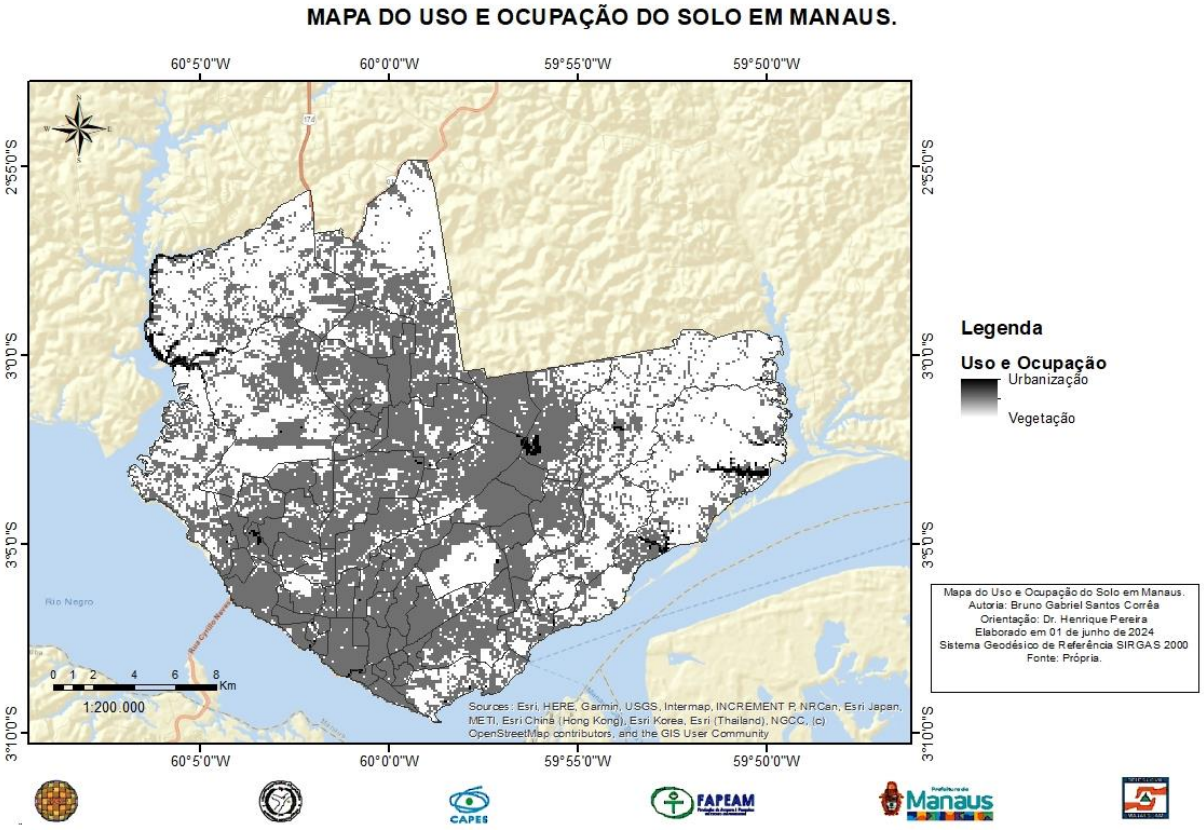


Fonte: Elaborado pelo autor.

O mapa de fluxo de direção apresenta uma elevada espacialização na região urbana de Manaus de modo contínuo, o que viabiliza o acúmulo hídrico nas zonas de baixa declividade. A variável de direção fluxo apresenta a influência hídrica na caracterização ambiental de Manaus em relação ao deslizamento, onde, por meio de um *raster* é possível contabilizar a importância hídrica na análise do fenômeno. A

obtenção do método *Flow Direct* é o recurso utilizado para relacionar a questão da hidrografia apresenta na caracterização da área de estudo, pois na cidade de Manaus há quantitativos expressivos de drenagens naturais que também são áreas de vulnerabilidade ambiental que habitadas na urbe conforme é apresentado na figura 35 é possível observar a urbanização em Manaus.

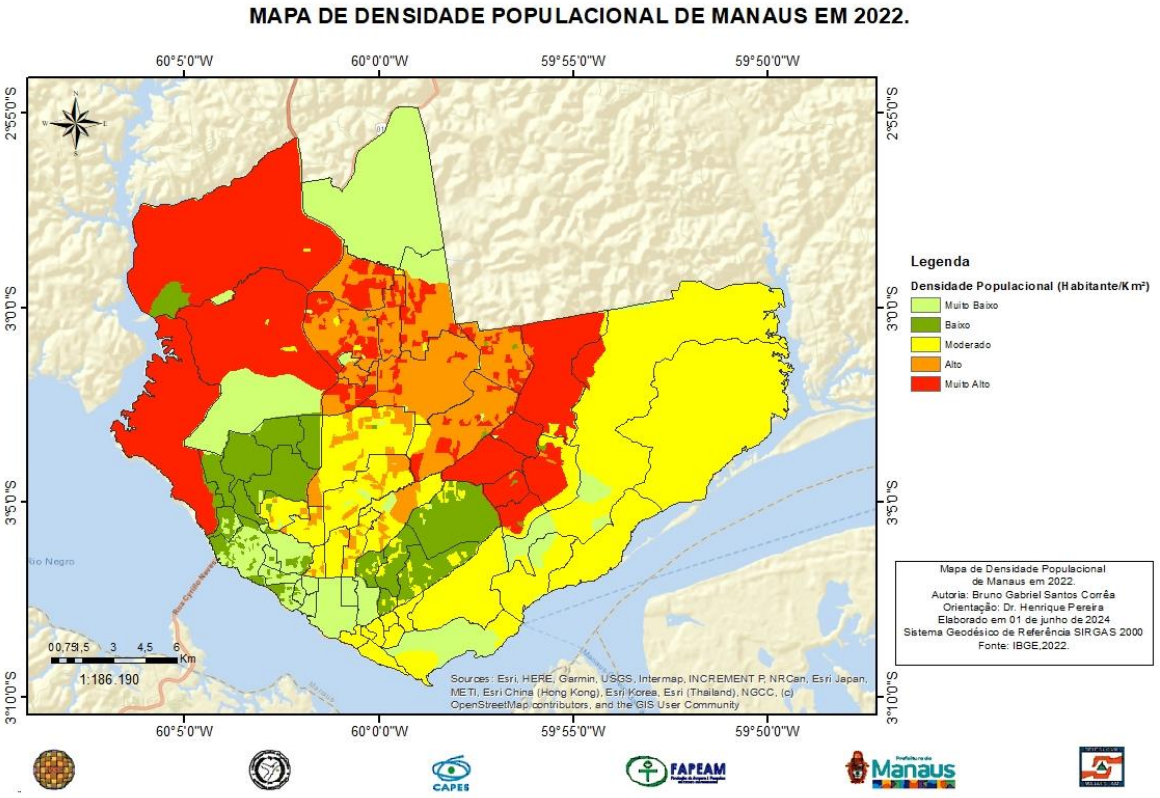
Figura 35. Mapa de uso e ocupação do solo de Manaus em 2022.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O mapa de uso e ocupação como parâmetro a ser utilizado no método de análise é fundamental para compreender a fragilidade da cobertura da superfície do solo e existência de habitantes na região. A elaboração desse mapa por ser processada por meio de imagem de satélite possui uma margem de erro na caracterização de zonas habitadas, por meio dessa análise a figura 36 apresenta a densidade urbana por setor censitário estabelecido pela malha do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE.

Figura 36. Mapa de densidade populacional de Manaus em 2022.

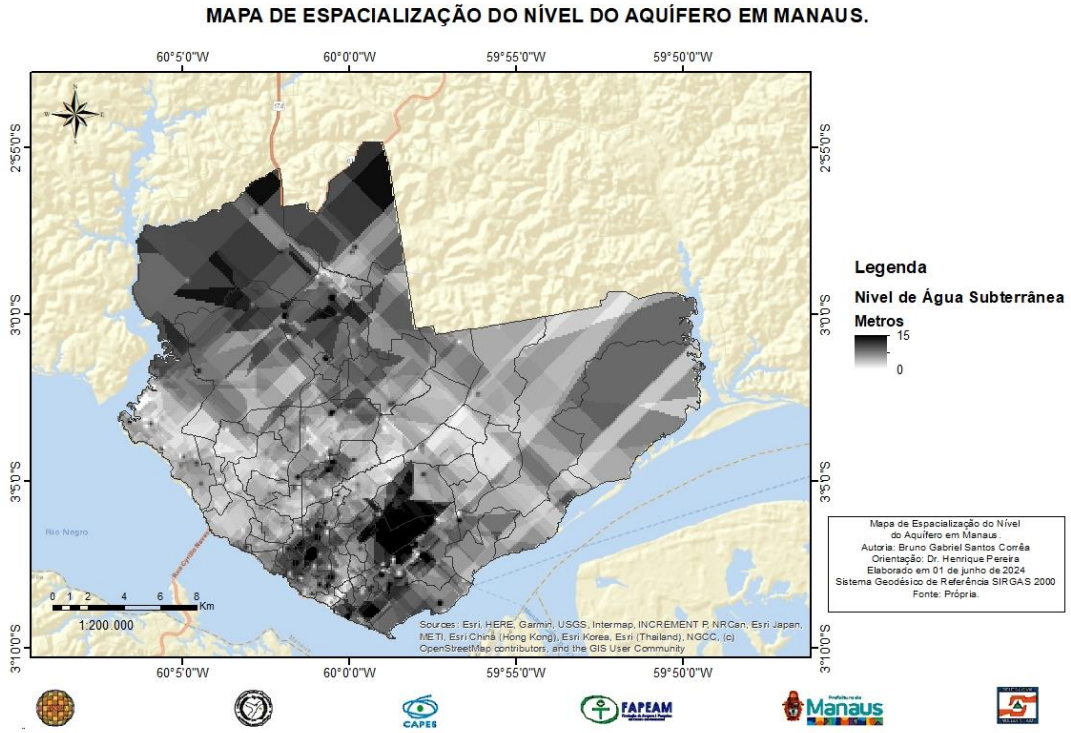


Fonte: Elaborado pelo autor.

A investigação da relação entre o uso e ocupação do solo com a densidade populacional minimiza a variabilidade espacial de erro na estimativa de zona de risco, pois para haver risco é necessária a presença de residentes no local. Consequentemente após a investigação dos parâmetros superficiais do fenômeno de movimento de massas os fatores a serem estudos no complemento dessa problemática está vinculado a parâmetros geotécnicos como profundidade do aquífero, resistência do solo por meio do SPT, coesão do solo, peso específico do solo e o ângulo de atrito.

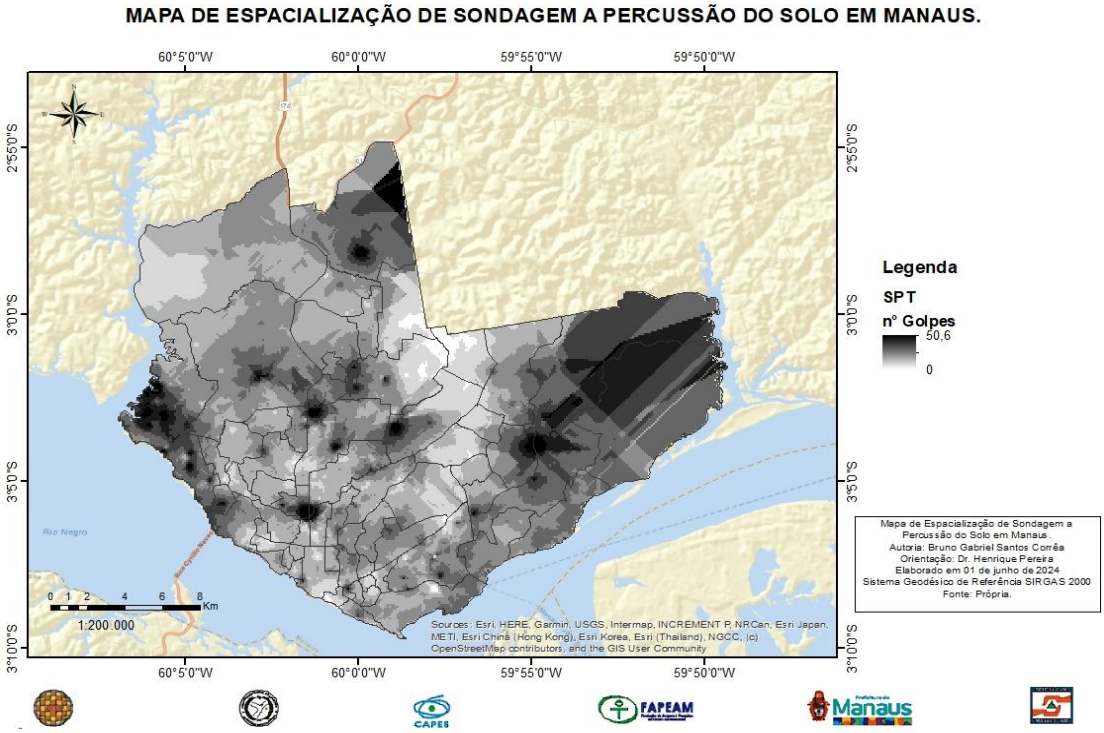
A investigação dessa análise geotécnica do solo obteve dados coletados pela disponibilidade de informação do Serviço Geológico do Brasil que possui um registro de 1370 pontos georreferenciados com dados das sondagens a precursão realizados por empresas privadas. No quantitativo das sondagens 790 pontos localizaram a profundidade do nível de água no solo (N.A), por meio disso o a uso da krigagem nesse parâmetro resultou nas figuras 37 a 41.

Figura 37. Mapa de espacialização do nível de água do aquífero no solo de Manaus.



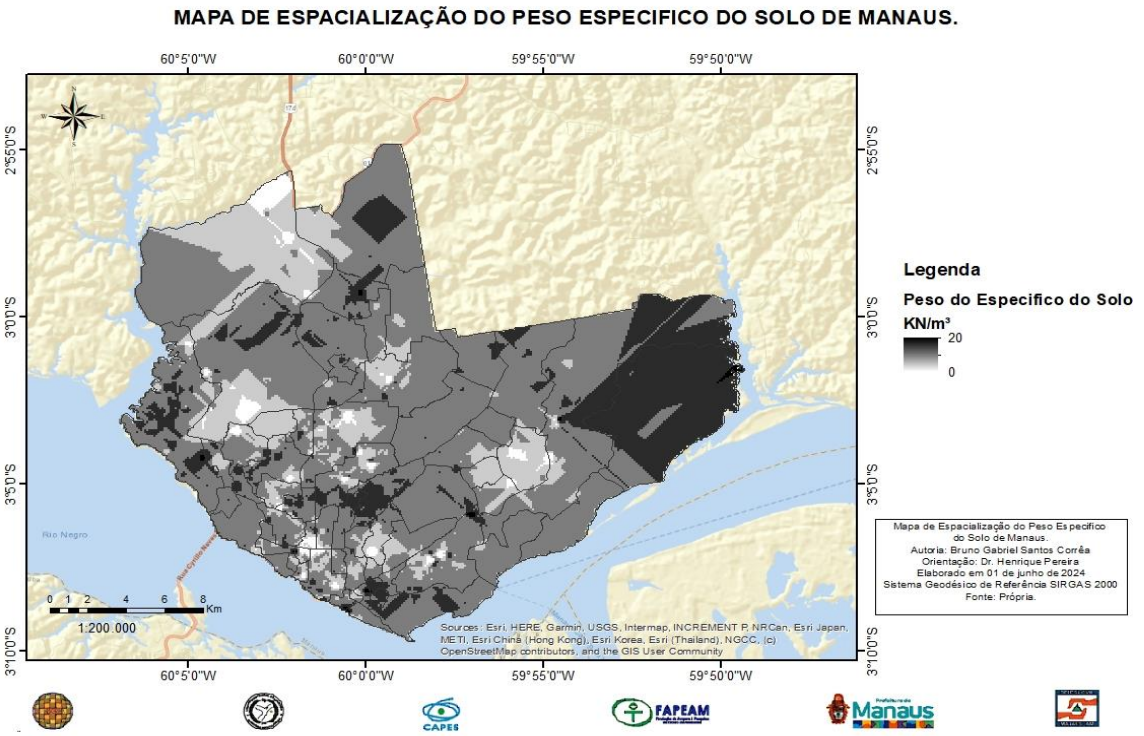
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 38. Mapa de espacialização de sondagem a percussão do solo em Manaus.



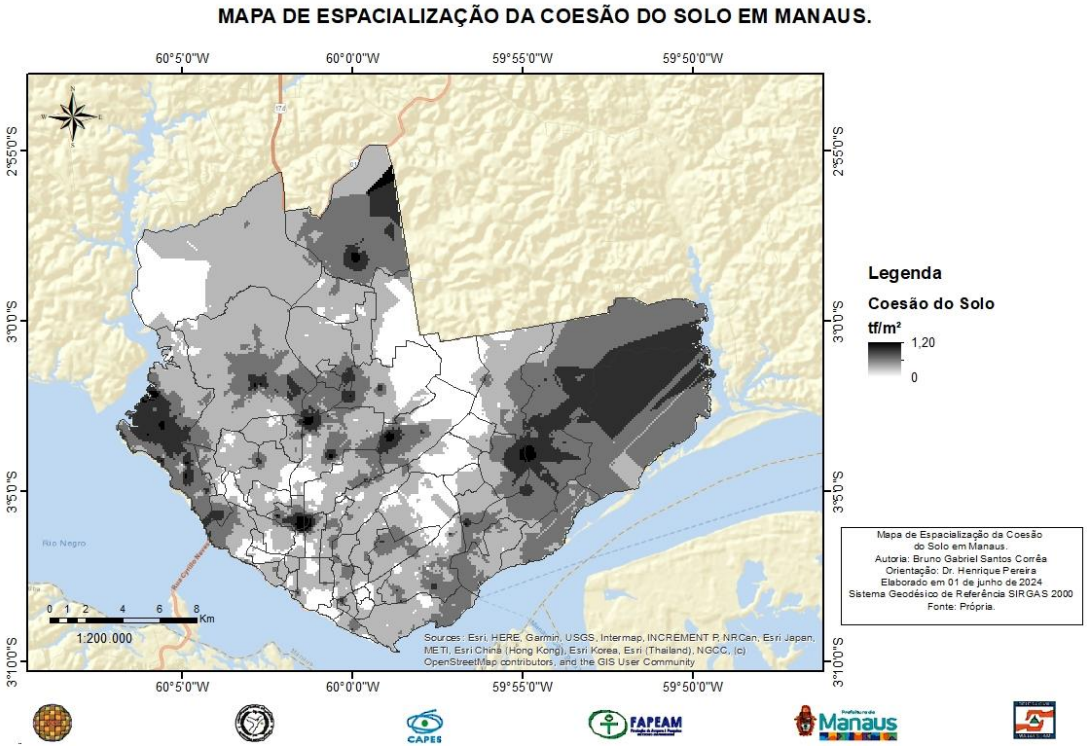
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 39. Mapa de espacialização do peso específico do solo em Manaus.



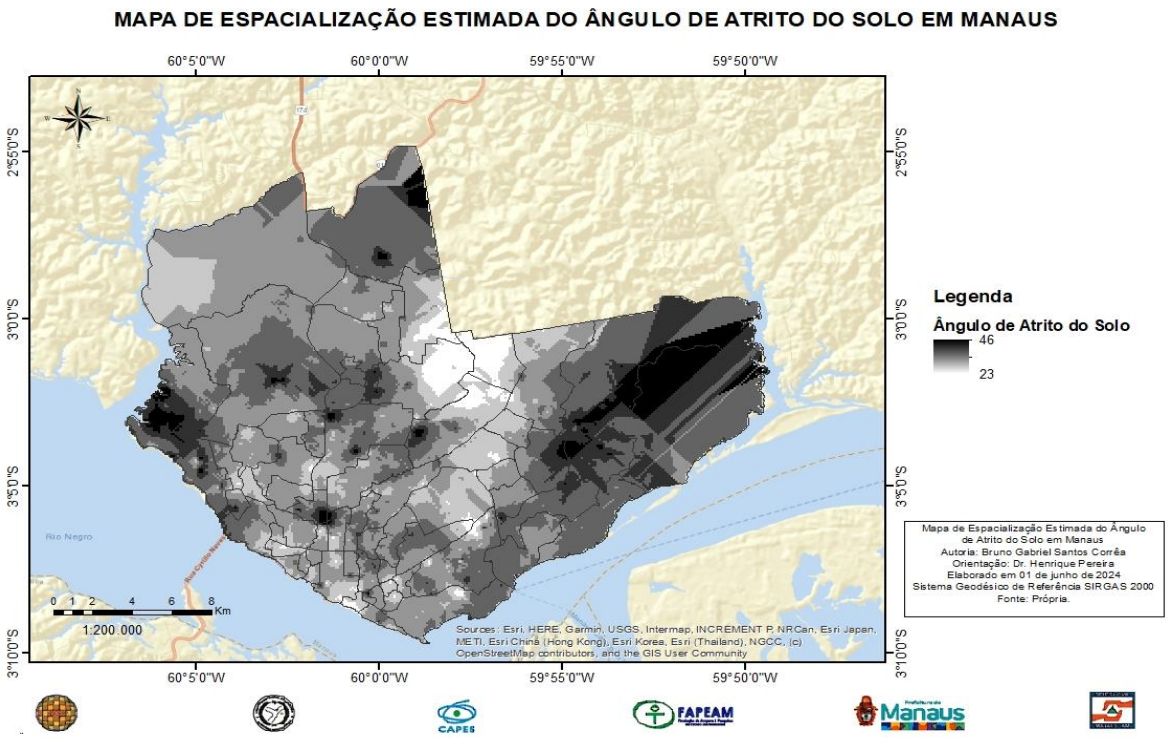
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 40. Espacialização da coesão do solo de Manaus.



Fonte: Elaborado pelo autor.

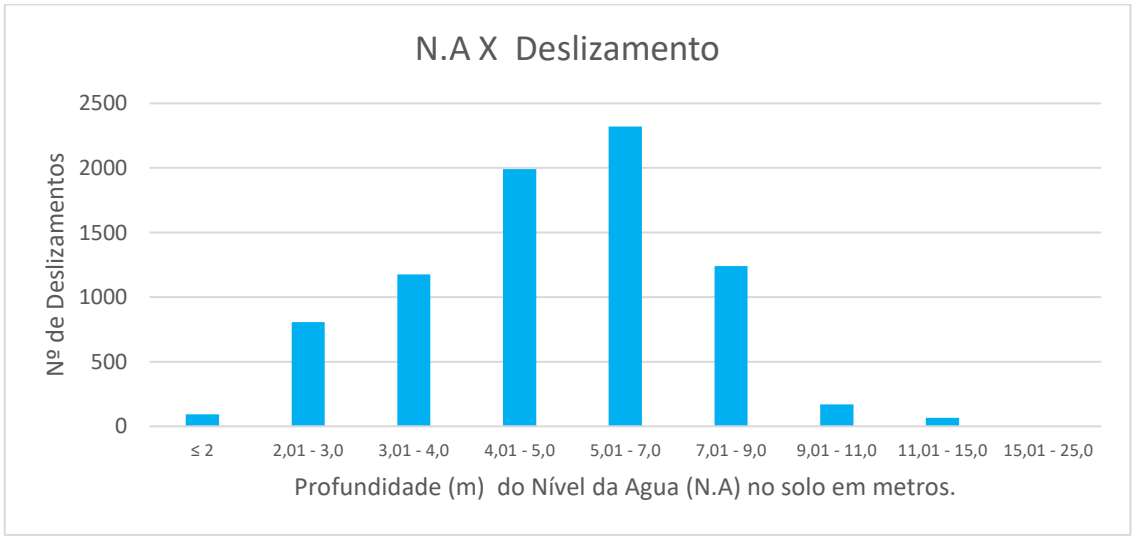
Figura 41. Espacialização estimada do ângulo de atrito do solo em Manaus.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A elaboração do *raster* do nível da água existente no solo proporciona uma contribuição na verificação da profundidade do aquífero em relação à superfície do solo. Na figura 42, é possível verificar as profundidades estimadas nos pontos de ocorrências de deslizamento. Por meio da correlação, é perceptível que profundidades até 7 metros contribuem de forma relevante ao fenômeno de movimento de terra.

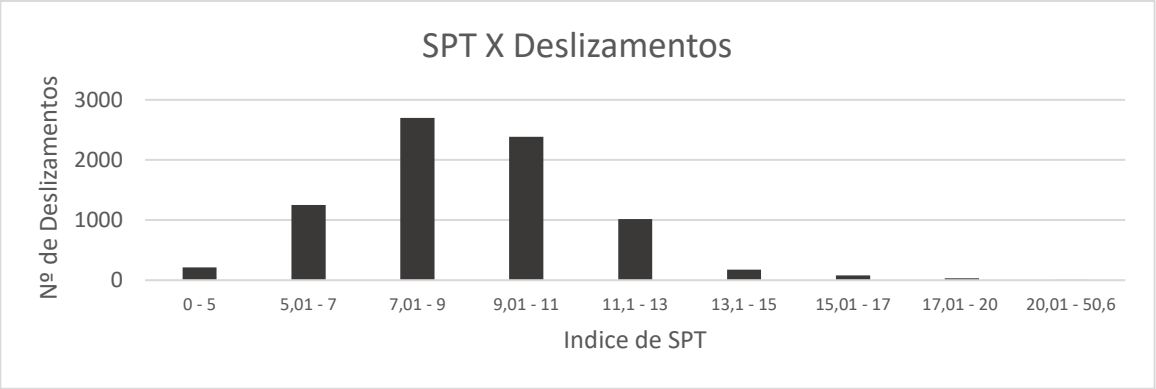
Figura 42. Percentual trimestral de deslizamentos em Manaus.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A abordagem desenvolvida para interpretar em modo de *raster* a camada corresponde a resistência do solo pelo método SPT se baseia na informação de dados até 5 metros de profundidade do solo. A compatibilização das amostragens de dados até 5 metros resultou na média da resistência aos golpes do ensaio que por meio da geostática foi ampliada a região urbana de Manaus. Na figura 43 são demostrados os valores de resistência do solo aos pontos de ocorrências existentes em Manaus.

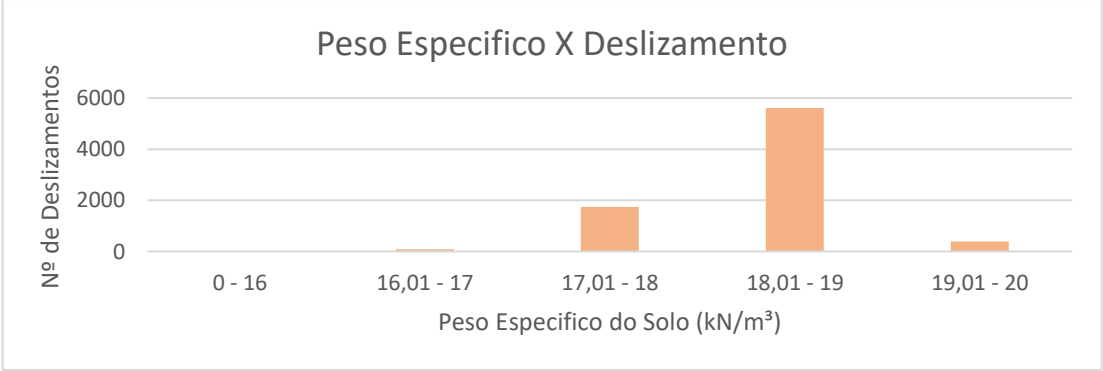
Figura 43. Relação do índice de SPT e os deslizamentos em Manaus.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A correlação da resistência estimada com os acontecimentos de deslizamentos caracteriza uma maior evidência de fatos em zonas com resistências de números golpes até 11. A partir dessa investigação, o estudo se direciona com apoio de métodos teóricos que estimam os parâmetros de peso específico do solo, coesão e ângulo de atrito. A figura 44 expõe o peso do solo estimado nos pontos de ocorrências de deslizamentos.

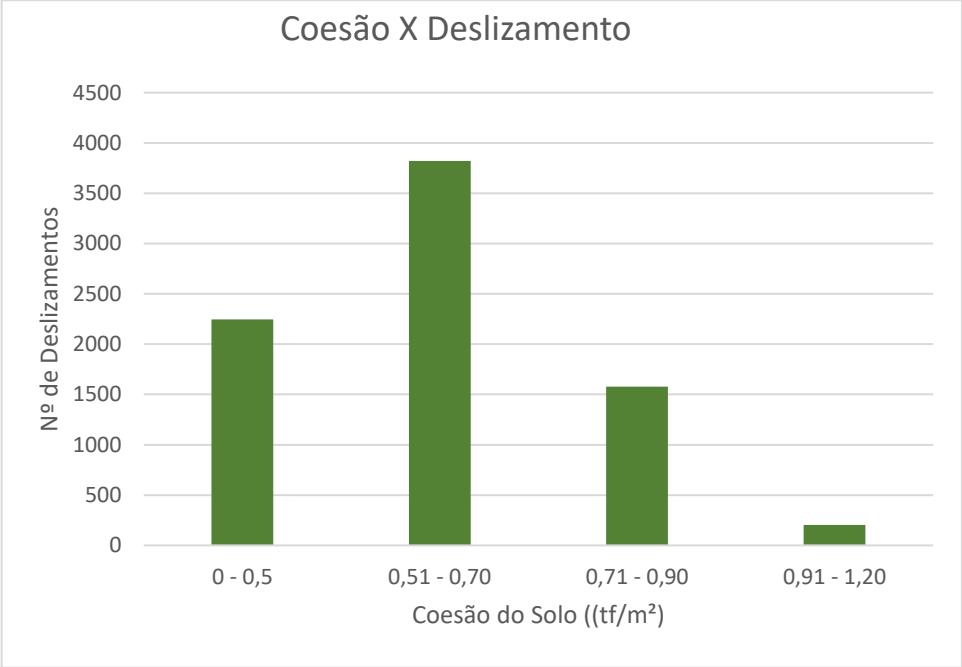
Figura 44. Relação do peso específico do solo com os registros de deslizamento em Manaus.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com os dados demostrados na figura 44, é possível compreender uma dominância na manifestação de faixa de peso específico de 18 a 19 kN/m³ e, pela tonalidade da legenda na figura 39, um mapa que verifica a espacialidade do solo com esse peso. Na investigação da coesão do solo, sendo o fator que descreve a resistência interna do solo ou a ligação existente das partículas referente às forças cisalhantes, é possível categorizar os valores de coesão propícios ao deslizamento na figura 45.

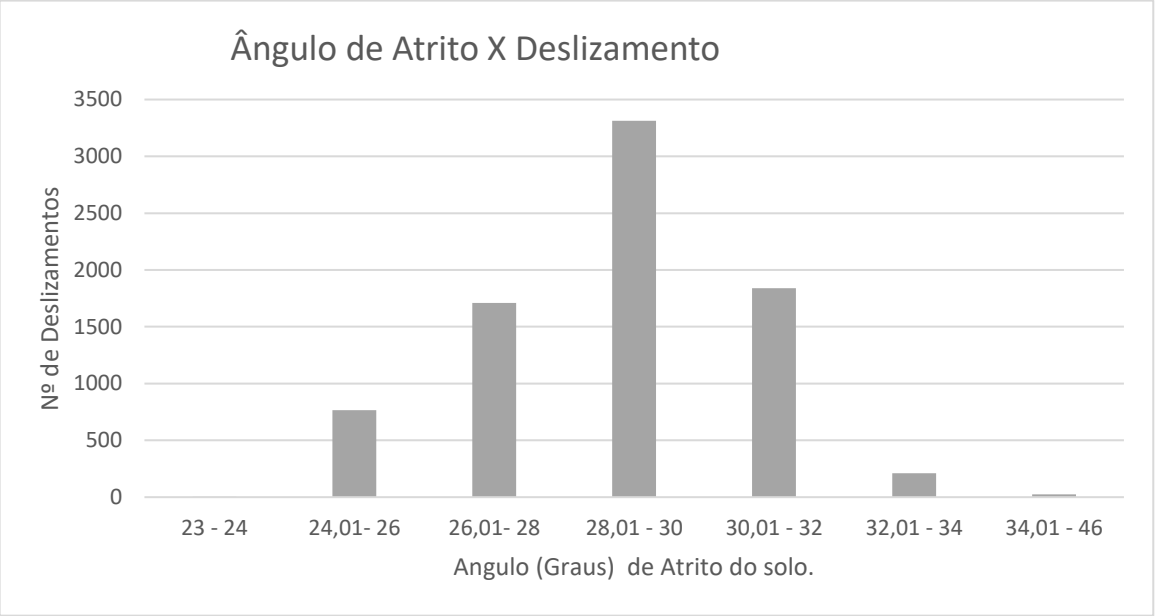
Figura 45. Relação da coesão do solo com as ocorrências de deslizamento em Manaus.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme o levantamento dos deslizamentos sobrepostos na estatística da coesão, é delimitado que zonas com coesão de 0,5 a 0,7 tf/m² são as que apresentam maior importância ao fenômeno de deslizamento. Após essas características abordadas, o último item a ser estimado é o Ângulo de Atrito, esse fator está relacionado às ações friccionais existentes entre as partículas do solo. Portanto, essa variável apresenta o ângulo máximo que a força transmitida ao solo vem atuar com a força normal à superfície de contato sem que ocorra o cisalhamento. A figura 46 apresenta a caracterização dos valores de ângulo de atrito em relação aos deslizamentos em Manaus.

Figura 46. Relação do ângulo de atrito do solo com os deslizamentos em Manaus.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na relação existente na figura 46, resulta que regiões com ângulo de 28 a 30 graus apresentam maior suscetibilidade a ocorrências de deslizamentos. Assim, ao verificar todos os parâmetros a serem correlacionados na Análise Hierárquica - AHP é perceptível uma relevância que aprimore o resultado dessa análise. Logo, essas informações podem ser posteriormente complementadas com outros parâmetros que venham refinar a modelagem de zonas de risco de deslizamento em Manaus em novos estudos.

6.4. Mapa de Risco a Deslizamento em Manaus

O estudo apresenta, por meio da análise hierárquica – AHP uma correlação entre os parâmetros apresentados no item 6.3 que resultam em arquivos *raster* com pixels de 30 x 30 metros. A metodologia da investigação de correlação é baseada nos pesos adotados de modo arbitrário conforme a relevância dos parâmetros para a descrição do deslizamento. A tabela 8 apresenta os pesos aderidos para a modelagem proposta do mapeamento de risco em Manaus.

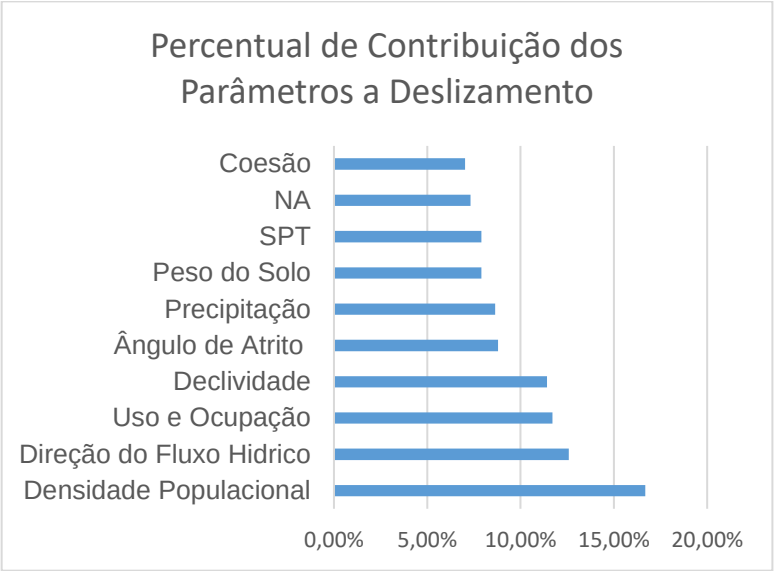
Tabela 8. Matriz ponderada de análise hierárquica dos parâmetros do estudo a deslizamento.

	Densidade Populacional	Direção do Fluxo Hídrico	Declividade	Uso e Ocupação	Precipitação	NA	Peso do Solo	Coesão	SPT	Ângulo
Densidade Populacional	1,00	3,00	2,00	3,00	2,00	2,00	2,00	2,00	1,00	1,00
Direção do Fluxo Hídrico	0,33	1,00	2,00	2,00	3,00	2,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Declividade	0,50	0,50	1,00	2,00	2,00	2,00	1,00	2,00	1,00	1,00
Uso e Ocupação	0,33	0,50	0,50	1,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	1,00
Precipitação	0,50	0,33	0,50	0,50	1,00	3,00	1,00	1,00	1,00	1,00
NA	0,50	0,50	0,50	0,50	0,33	1,00	1,00	1,00	2,00	1,00
Peso do Solo	0,50	1,00	1,00	0,50	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Coesão	0,50	0,50	0,50	0,50	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
SPT	1,00	1,00	1,00	0,50	1,00	0,50	1,00	1,00	1,00	1,00
ângulo	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Fonte: Elaborado pelo autor

Na tabela 8 a correlação entre parâmetros das linhas e colunas são relacionas para a determinação de valores a serem estimados em relação à contribuição desses fatores para o fenômeno de deslizamento, por meio a diagonal por ser fatores iguais acabam tendo o valor de um, pois possui relevância igual para o estudo de movimentação de terra. A metodologia da análise hierárquica é uma modelagem bastante aplicada em questões ambientais, pois os valores estimados podem variar na modelagem de fenômenos e ações. Na figura 47 são apresentados os valores estimados conforme a tabela 15 que determina o valor segundo a importância existente entre a coluna e a linha em relação à movimentação de terras. Após, por meio matemático de cálculo da matriz, é possível encontrar os autovetores de cada fator que podem ser apresentados na figura 47.

Figura 47. Percentual de contribuição dos parâmetros a deslizamento em Manaus



Fonte: Elaborado pelo autor

A definição da figura 47 exemplifica que a densidade populacional é um dos fatores de maior contribuição na modelagem, essa consideração ocorre em virtude que para o risco de fato existir é necessário a presença de indivíduos no local e por meio dessa concepção esse fator se determinou com o de maior relevância. Os fatores com porcentagem abaixo também contribuíram de modo significativo com percentual de influência superiores a 5% o que mostra a importância da inclusão dessas camadas para a calculadora de *raster* com o uso dos autovetores estimados. A tabela 9 apresenta as resultantes matemática do produto da tabela 8 onde é apresentada a matriz com os pesos de relevâncias.

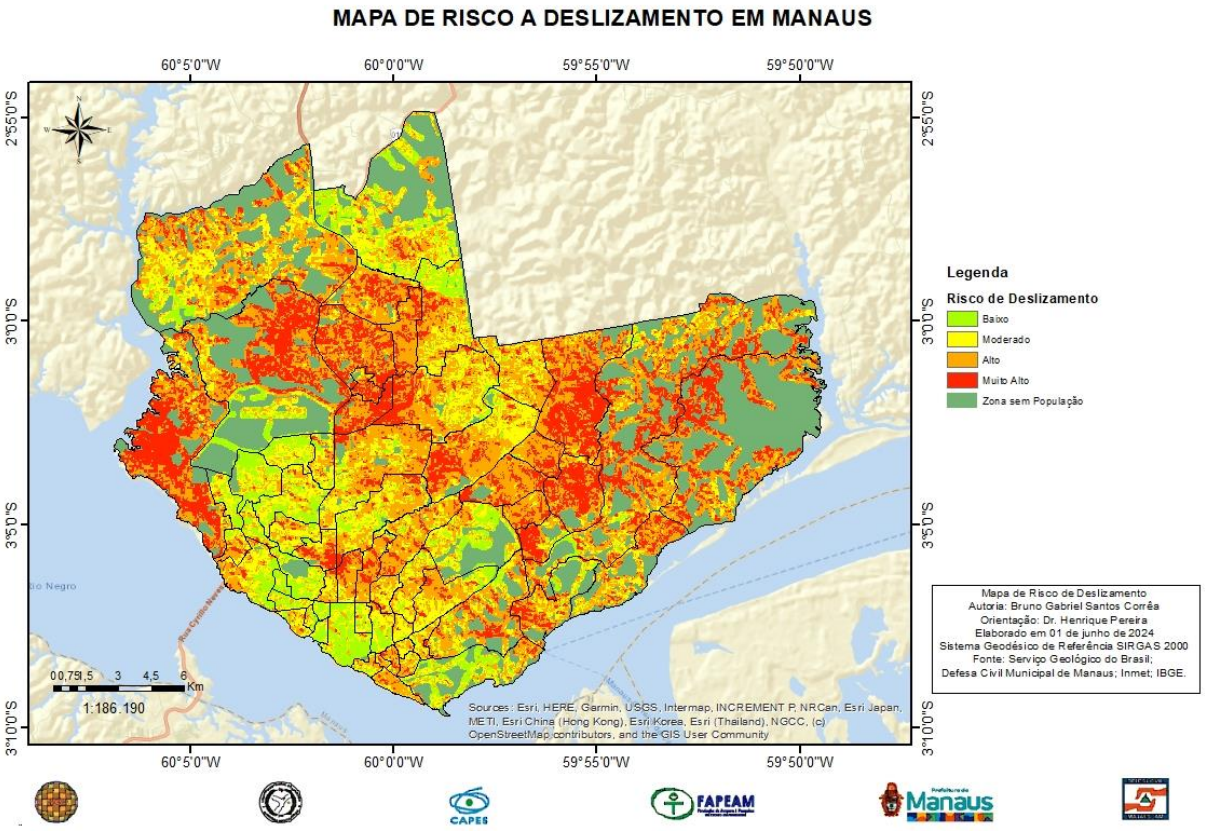
Tabela 9. Cálculos derivados da matriz da análise hierárquica sobre deslizamento em Manaus.

Soma das Linhas	Autovetor (W)	N° de Critérios	Produto Vetorial (D*W)	Lambda	Lambda Máximo	Índice de Consistência	IR	RC
19,00	0,167	10	1,909	11,44	10,72	0,08025075	1,49	0,053
14,33	0,126		1,366	10,85				
13,00	0,114		1,201	10,51				
13,33	0,117		1,157	9,88				
9,83	0,086		0,863	9,99				
8,33	0,073		0,759	10,37				
9,00	0,079		0,858	10,85				
8,00	0,070		0,738	10,50				
9,00	0,079		0,905	11,44				
10,00	0,088		1,000	11,38				

Fonte: Elaborado pelo autor

Na tabela 9 ao analisar os valores resultantes é possível encontrar a razão de consistência (RC) da análise hierárquica – AHP que obteve um valor de 0,053 aprovado desse modo a modelagem desenvolvida, pois o valor da razão é aceitável se apresentar valores dentro limite menor que 0,1. Partindo dessa premissa os valores dos parâmetros são multiplicados pelas suas respectivas *rasters* que resultam na figura 48.

Figura 48. Mapa de risco de deslizamentos em Manaus.

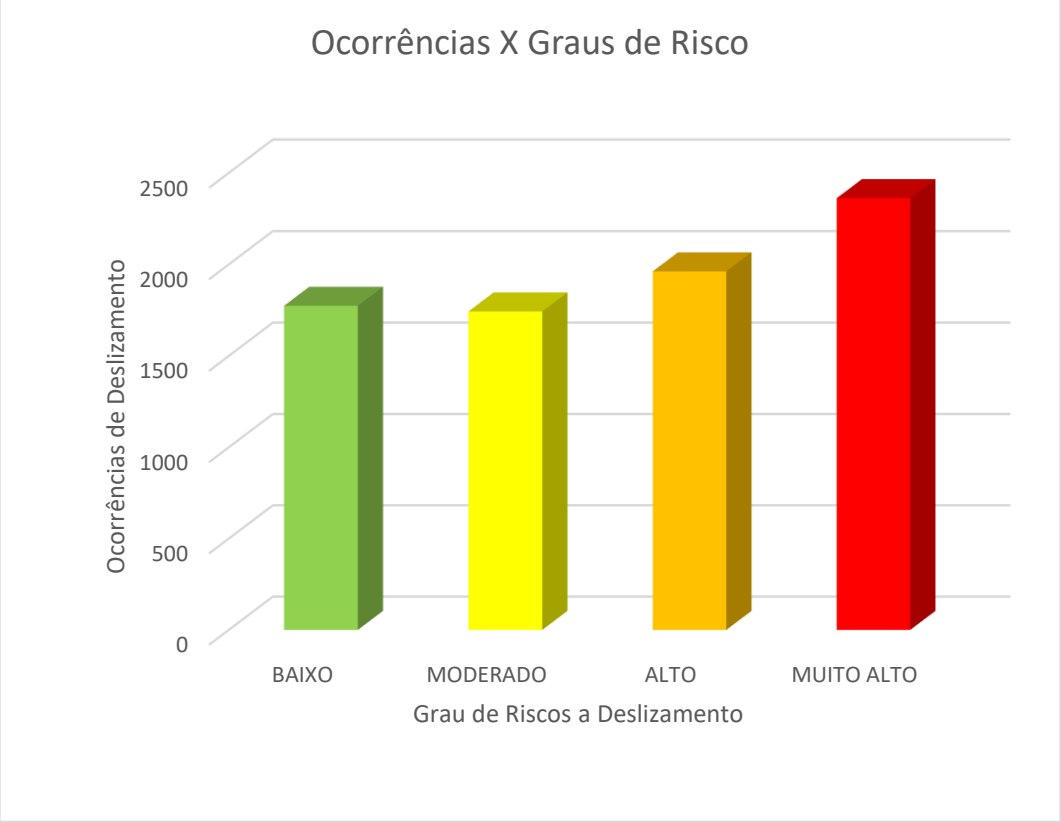


Fonte: Elaborado pelo autor.

O mapa de risco a deslizamento é um produto *raster* com dimensões de *pixels* de 30m e sua categorização foi elaborada por quantil da variação desses valores da quadrícula do *raster*. O quantil na categorização do risco foi o método mais adequado para a interpretação das zonas de risco no espaço urbano de Manaus. O produto com as categorias de risco baixo a muito alto a deslizamento é uma ferramenta que vem auxiliar na sistemática de planejamento a mecanismos que minimizem os riscos

nessas zonas. Partindo dessa premissa, o estudo para validar a categorização correlaciona os dados de deslizamentos das ocorrências registradas de 2002 a 2022 pela Defesa Civil Municipal de Manaus com as classes apresentadas na figura 48. Na figura 49 apresenta-se o número de ocorrências existentes em cada categoria.

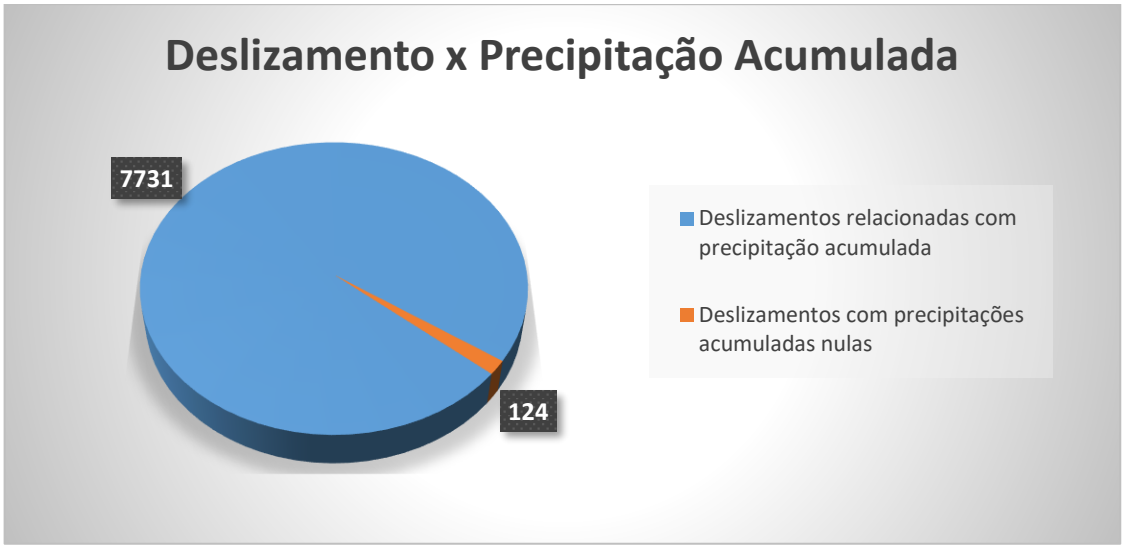
Figura 49. Relação de ocorrências de deslizamentos nos grupos de riscos em Manaus.



Fonte: Elaborado pelo autor

A figura 49 apresenta uma crescente dos números de ocorrências em cada categoria, por meio disso ratifica que as classes apresentam um real cenário de zonas de risco a deslizamento. As ocorrências por grupo demostram que o risco baixo possui um elevado número de registros, porém, ao analisar a figura 49, é verificada uma espacialidade nessas zonas que justifique essa resultante e, mesmo com o índice alto, não descaracteriza a hierarquia das classes de risco. Na figura 50, conseguimos compreender o quantitativo de 7855 pontos de ocorrências contabilizadas na série de registro de deslizamento.

Figura 50. Relação de números de deslizamentos com precipitações acumuladas em Manaus



Fonte: Elaborado pelo autor

A figura 50 demostra em valores o quantitativo de 124 ocorrências onde a falta de precipitação acumulada está vinculada ao fenômeno de deslizamento. Partindo dessa premissa é indubitavelmente que a ação antrópica é um dos fatores que sobrepõe as características ambientais que propiciam a ação de movimento de terra, pois eventos como infraestrutura de residências comprometidas em área de risco, rompimento de tubulação de rede de drenagem ou abastecimento impulsionam a incidência do deslizamento. A análise da relação a precipitação e ocorrência nos graus de risco mostra uma relevância nesse parâmetro e propicia o uso deste fator para um modelo de estimativa de ocorrência na região.

Do mesmo modo que o fator de precipitação no método de análise hierárquica é a precipitação apresentar a sexta colocação, a sua variabilidade de incidência na cronologia é algo que interfere de modo dinâmico na incidência de alerta nas classes de riscos estabelecidas. A tabela 10 apresenta o percentual de estimativa de ocorrências existentes nas classes de risco relacionadas à precipitação coletadas da estação do INMET.

Tabela 10. Registro de dados pluviométricos em Manaus no período de 2002 a 2022.

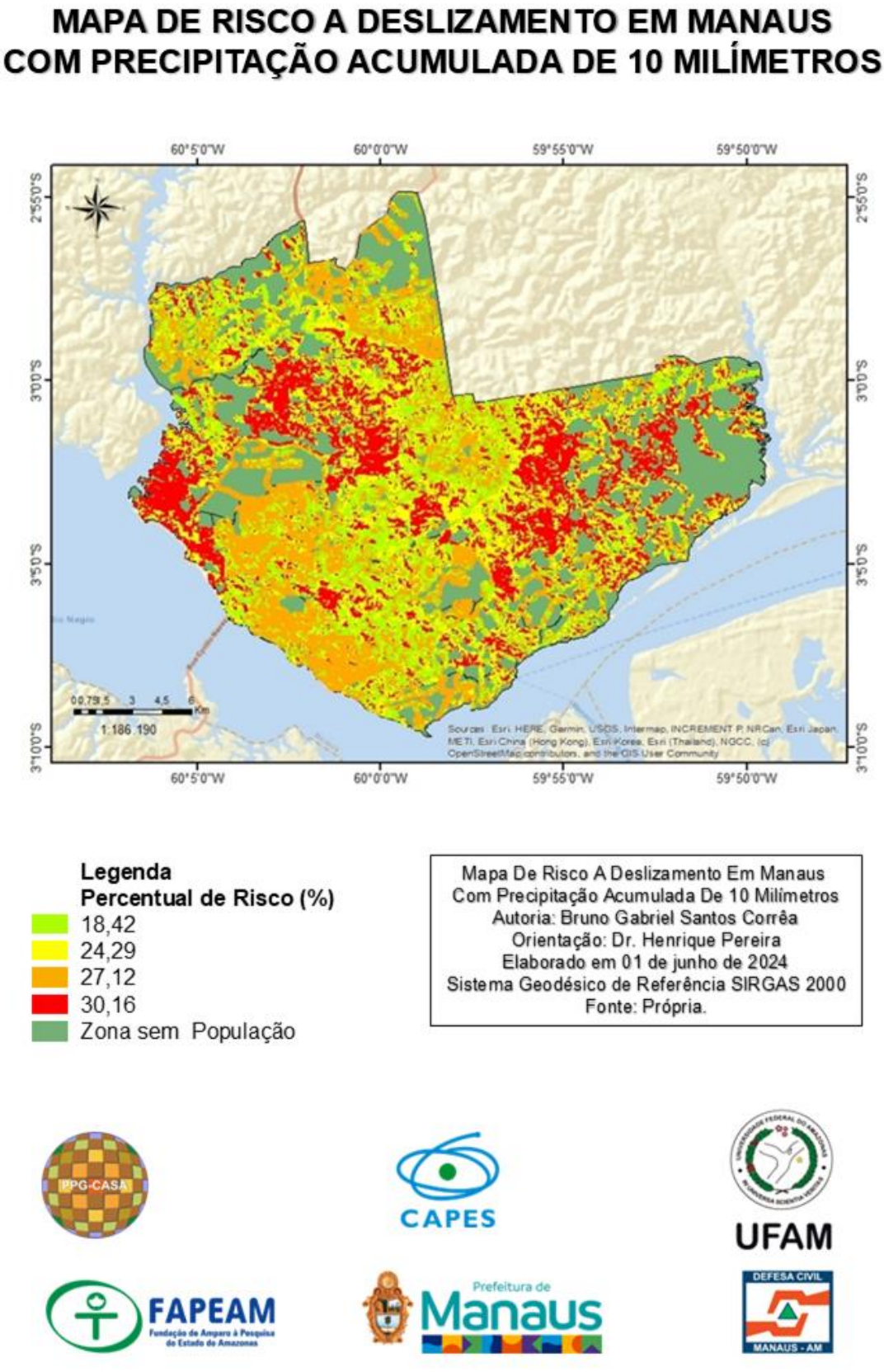
Precipitação Acumulada em 7 dias (mm)	Porcentagem de Ocorrência em Relação aos Graus de Risco do Mapa			
	BAIXO	MODERADO	ALTO	MUITO ALTO
10	27,13	18,42	24,29	30,16
20	25,28	20,05	24,72	29,95
30	23,40	20,74	24,10	31,77
40	23,94	21,43	23,70	30,93
50	23,89	20,96	24,21	30,94
60	23,43	21,57	24,66	30,34
70	23,64	22,07	24,36	29,92
80	23,81	22,38	24,22	29,58
90	23,88	22,43	24,15	29,55
100	23,85	22,42	24,38	29,34
125	23,77	22,23	24,48	29,51
150	23,67	22,45	24,36	29,52
175	23,11	22,27	24,73	29,88
200	23,04	22,31	24,72	29,92
225	22,87	22,31	24,84	29,97
250	22,82	22,31	24,97	29,90
275	22,76	22,28	24,93	30,03
300	22,74	22,25	24,96	30,05
325	22,62	22,23	25,02	30,12

Fonte: Elaborado pelo autor

Na tabela 10 se ordenou o registro de ocorrências classificadas nos 4 grupos de riscos, por meio desse levantamento foi verificado o percentual de ocorrências caracterizados em intervalos de milímetros de precipitação acumulada. Os percentuais categorizados nesses grupos de risco apresentam uma modelagem georreferenciadas das zonas que necessitam de atenção em relação ao índice acumulado de precipitação.

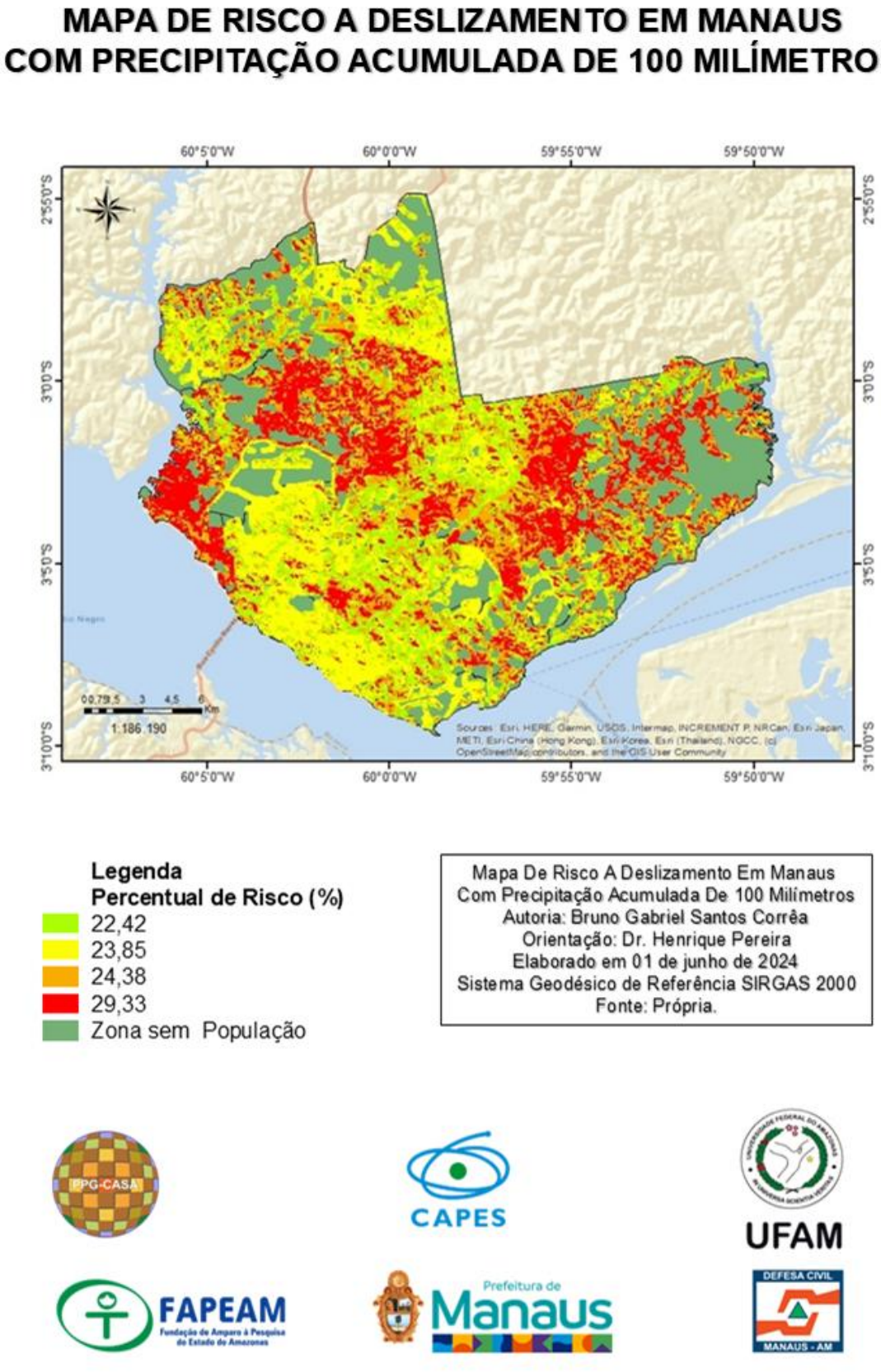
Os mapas 51 e 52 apresentam a dinâmica da proposta de mapeamento dos alertas de risco a deslizamentos em relação às categorias definidas na figura 48.

Figura 51. Mapa de risco a deslizamento em precipitação acumulada de 10 milímetros em Manaus.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 52. Risco a deslizamento em precipitação acumulada de 100 milímetros em Manaus.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao observar uma precipitação de 10 milímetros conforme a figura 51, a atenção de alerta, as categorias de risco estabelecidas no mapa alteram e possibilitam as regiões de baixo risco e alto risco com maior vulnerabilidade. A alternância dessas manifestações em percentual nas classes de risco é registrada com precipitações acumuladas baixas até 50 milímetros. A figura 52 mostra que a sistemática espacial já adere com precipitações acumuladas superiores a 100, a característica de categoria de risco proposta no estudo. Partindo dessa concepção, o mapa de risco caracteriza a padronização do cenário de maior intensidade de precipitação na região e a vulnerabilidade do risco a deslizamento.

Desse modo, o estudo conseguiu desenvolver uma modelagem de parâmetro para o auxílio à resiliência dos órgãos públicos para ações que reduzam esses riscos. Consequentemente, o modelo apresentado se adequa à Carta de Risco desenvolvida pelo Serviço Geológico do Brasil (2012), que categorizou algumas localidades de risco que se situam no modelo em zonas de moderado a muito alto em incidência de deslizamento no modelo proposto. Assim, os registros das ocorrências da Defesa Civil Municipal de Manaus no período de 2002 a 2022 são parâmetros de acurácia na modelagem resultante do estudo, que por meio da razão de consistência apresenta uma relevância de 0,05 que se estabelece dentro do parâmetro de validação do modelo.

7. CONCLUSÃO

A investigação de análise dos riscos de deslizamentos no espaço urbano de Manaus é um estudo fundamental para auxílio no desenvolvimento da resiliência a ações desse fenômeno ambiental. Nas investigações bibliográficas a ciência com melhor desenvolvimento para a abordagem dessa temática é o geoprocessamento que apresenta alguns métodos de modelagens geoestatísticas como o SHALSTAB, SINMAP, AHP e outros. Ao verificar os teóricos de geoprocessamento é perceptível uma baixa produção de modelagens a deslizamentos existentes na região norte do Brasil, o que apresenta um déficit na área de estudos relacionados a fenômenos ambientais urbanos. Dessa maneira na investigação de metodologias o estudo compreendeu uma certa problemática na execução de alguns modelos metodológicos pela falta de informação para a execução dos métodos, por meio disso se baseando nos parâmetros investigados na maioria desses métodos o estudo se embasou na metodologia AHP- Análise Hierárquica de Processos.

A metodologia do AHP é um recurso com maior aplicabilidade no geoprocessamento e por ter um coeficiente de confiabilidade, se apresentou como uma ferramenta adequada para a obtenção de resultados no estudo. Portanto, com o auxílio das literaturas científicas, o estudo se orientou nos parâmetros de uso e ocupação do solo, densidade populacional, declividade, fluxo de direção, precipitação acumulada, SPT, coesão, peso específico do solo, ângulo de atrito e nível do aquífero. Consequentemente, na modelagem do estudo, ao analisar esses fatores, é compreendido que as características locais do solo pouco variam no impacto de deslizamento em virtude de sua baixa variabilidade. Entretanto, são características fundamentais para a caracterização e interpretação desse fenômeno. Ao investigar esse tipo de risco, é importante destacar a relevância da densidade populacional, declividade e uso e ocupação, pois são os aspectos locais que interferem de modo intenso na vulnerabilidade de uma determinada região, conforme verificado na modelagem desenvolvida. Desse modo, as variáveis com relevância são aquelas que sofrem alterações por ações antrópicas e que podem minimizar ou intensificar o fenômeno de deslizamento.

Em síntese é possível verificar também a importância da precipitação na ocorrência de deslizamento, pois com o mapeamento e correlação dos registros é

possível elaborar uma sistemática estática de probabilidade na espacialização de risco em Manaus. Assim a modelagem apresenta uma correlação do modelo proposto como o número de ocorrências registradas, por meio disso validando a categorização dos riscos onde as zonas norte e leste de Manaus são as regiões com maiores zonas de alto risco.

Logo, o estudo resulta que existe uma correlação positiva entre os parâmetros analisados, pois os registros das ocorrências de deslizamento validam o resultado do produto desenvolvido no estudo. Portanto, a categorização dos riscos da modelagem propicia as limitações das áreas de grande risco que necessitam de ações com maior rigor para a minimização desses eventos. Em virtude dessa categorização e por meio da precipitação acumulada, é possível estimar em percentual as chances de o fenômeno acontecer nessas categorias. Desse modo, o modelo proposto irá estimular novas subdivisões e análises em futuros estudos de deslizamento em Manaus.

REFERÊNCIAS

ALLESSI, C. C. Análise estatística e geoestatística da distribuição de CO2, CH4, Rn e microbiota em um campo petrolífero do recôncavo baiano (BA). Dissertação (Mestrado). Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2011. 218p.

ARONOFF, S. Geographic Information Systems. WDL. Publications, Canada. 1989. 292p.

BONETTI, JOSÉ CARLOS. Pressupostos bioclimáticos de conforto térmico para uma arquitetura dos trópicos úmidos. Manaus, 1999. Universidade Federal do Amazonas.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 6484:2020. Solo: Sondagem de simples reconhecimento com SPT- Método de ensaio, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 7250:1982. Identificação e descrição de amostras de solos obtidas em sondagens de simples reconhecimento dos solos. ABNT, Rio de Janeiro (substituída pela NBR 6484:2001)

BONUCCELLI, T. (1999). Estudos dos movimentos gravitacionais de massa e processos correlatos da área urbana de Ouro Preto / MG. Tese de Doutorado em Engenharia Civil: Área de Geotecnia. USP / São Carlos.

BULL, G. Ecosystem Modelling with GIS. Environmental Management, p. 18(3): 345-349. 1994.

BURROUGH, P. A. e MCDONNELL, R. A. Principles of Geographical Information Systems. Oxford: Oxford University Press, 1998. 333 p.

CÂMARA, G.; QUEIROZ, GR de. Arquitetura de sistemas de informações geográficas. Introdução à ciência da geoinformação, 2006.

CAMARGO, EDUARDO CELSO GERBI; FUCKS, SUZANA DRUCK; CÂMARA, GILBERTO. Análise espacial de superfícies. Análise espacial de dados geográficos. Planaltina: Embrapa Cerrados, p. 79-122, 2004.

CAPUTO, M.V. 1984. Stratígraphy tectonrcs, paleoclímatology and paleogeography of Northern Basms of Brazil Santa Barbara, University of California,583p.

CARVALHO, IGOR AMORIM DE et al.. Os impactos da fisiografia de Manaus sobre os sistemas meteorológicos. 2022.

CASSETI, VALTER. Geomorfologia, 2005. Disponível em: http://www.funape.org.br. Acesso: 25/08/2024.

COSTA, D.; OLIVEIRA, J. Conjuntos habitacionais e a expansão urbana de Manaus filigramas do processo de construção urbana e o papel das políticas habitacionais. Mercator - Revista de Geografia da UFC, ano 6, n. 11, 2007.

COSTA, REINALDO CORRÊA. Riscos, fragilidades & problemas ambientais urbanos em Manaus. Manaus: Editora INPA, 2017.

CREA-AM (2018). CREA atesta segurança em obra na avenida Djalma Batista. Disponível em: http://www.manaus.am.gov.br. Acesso em 09 de junho de 2024.

CUNHA. H. B., & PASCOALOTO, D. Hidroquímica dos rios da Amazônia. Manaus: Governo do Estado do Amazonas. Manaus, 2006.

DE ALMEIDA, L. Q.; WELLE, T.; BIRKMANN, J. Disaster risk indicators in Brazil: a proposal based on the world risk index. International journal of disaster risk reduction, v. 17, p. 251-272, 2016.

DRUCK, S.; CARVALHO, M. S. Análise Espacial de Dados Geográficos. Brasília. EMBRAPA, 2004. 209 p.

FAVERI, VITOR JOSÉ; LUCAS, BÁRBARA FERNANDA KLAUMANN - Obtenção Do Ângulo de Atrito Interno e Coesão do Solo a partir de Sondagens SPT realizadas na UTFPR. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, PR, 2021.

GERSCOVICH, D. Estabilidade de Taludes. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

GODOY, N. S. Estimativa da capacidade de carga de estacas a partir de resultados de penetrômetro estático. Palestra proferida na Escola de Engenharia de São Carlos – USP. 1983.

GODOY, N.S. Fundações: Notas de aula, Curso de Graduação. São Carlos, SP, Escola de Engenharia de São Carlos – USP, 1972.

GOERL, R.F.; KOBIYAMA, M. Considerações sobre as inundações no Brasil. In: Anais XVI Simpósio Brasileiro De Recursos Hídricos, Porto Alegre: ABRH, 2005.

GOOVAERTS, P. Geostatistics for natural resources evaluation. New York: Oxford University Press, 1997. 476 p.

GOVERNO DO ESTADO DO AMAZONAS. 2010. Secretaria de Estado de Planejamento e Revista Brasileira de Geografia Física V. 06, N. 01 (2013) 001-014 Santos, C.A. dos; Lima, J.R.A.

GREGO, CÉLIA REGINA; DE OLIVEIRA, RONALDO PEREIRA; VIEIRA, SIDNEY ROSA. Geoestatística aplicada a Agricultura de Precisão. 2014.

GUERRA, A. J. T; MARÇAL, M. S. Geomorfologia ambiental. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2006. 190p.

GUIDICINI, G.; NIEBLE, C.M. Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação. 2. ed. São Paulo, SP: Edgard Blucher, 1984. 194 p.

HATANAKA, M.; UCHIDA, A. Empirical correlation between penetration resistance and effective friction of sandy soil. Soils Found, v. 36, n. 4, p.1-9, 1996.

HENGL, T. A practical guide to geostatistical mapping. Amsterdam: University of Amsterdam, 2009.

HONÓRIO, BENÍCIA DE ALMEIDA DIAS. Água da chuva na Amazônia Ocidental: química e composição isotópica. 2008.

IPCC. Mudanças Climáticas 2014: Impactos, Adaptação e Vulnerabilidade. Parte A: Aspectos Globais e Setoriais. Contribuição do Grupo de Trabalho II ao Quinto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas FIELD, CB; BARROS, VR; DOKKEN, DJ; MACH, KJ; MASTRANDREA, MD *et al.* (ed.). Cambridge: Cambridge University Press, 1132 p., 2014.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS – IPT. Mapeamento de Riscos em Encostas e Margem de Rios. In: CARVALHO, Celso S.; MACEDO, Eduardo S.; OGURA, Agostinho T. (Org.). Brasília: Ministério das Cidades, 2007.

JOPPERT JR, IVAN. Fundações e Contenções de Edifícios – São Paulo: Pini ISBN 978-85-7266-177-5, 2007. 221p.

JOURNEL, A. G. & HUIJBREGTS, J.C.H. - Mining geostatistics. Academic Press,1978, 600p.

KOUSKY, C. Informing climate adaptation: a review of the economic cost of natural disasters, There are determinants, and risk reduction options. Resources for the Future Discussion Paper. DP 12-28, jul. 2012.

LANDIM, P.M.B. Introdução aos métodos de estimação espacial para confecção de mapas. DGA,IGCE,UNESP/Rio Claro, Lab. Geomatemática.Texto Didático 02, 20 pp. 2000.

LANDIM, P.M.B & STURARO, J.R. Krigagem Indicativa aplicada à elaboração de mapas probabilísticos de riscos. Geomatemática,Texto Didático 6, DGA,IGCE,UNESP/Rio Claro, 2002. Disponível em http://www.rc.unesp.br. Acesso em: 16 jul.2024

LOPES, LEANDRO DE LIMA; MENDES, LUANA FERREIRA. Análise de Solo por meio de Sondagem SPT: estudo de caso de uma residência de dois pavimentos em ambiente urbano, 2020.

LUCAS, Y. System pedologiques en amazonie bresilienne equilibres, desequilibres et transformation. (Tese de Doutorado) Paris – França, L'Université de Poitiers - U.F.R. SCIENCES FONDAMENTALES ET APPLIQUEES, 184 p. 1988

VIEIRA, A.F.G. Desenvolvimento e distribuição de voçorocas em Manaus (AM): principais fatores controladores e impactos urbano-ambientais. (Tese de doutorado). Florianópolis: UFSC/CFH, 2008.

MACIEL FILHO, C.; NUMMER, A. Introdução à Geologia de Engenharia. 5 ed. Santa Maria: Editora da UFSM, 2014.

MARANGON, M. Geotecnia de Fundações. Universidade Federal de Juiz de Fora, Apostila de curso, 2009.

NARVÁEZ, L.; LAVELL, A.; PÉREZ, G. La gestión del riesgo de desastres. Secretaria General de la Comunidad Andina, 2009.

PINESE JÚNIOR, J. F. 2010. Aplicação do método de análise hierárquica – AHP – para a determinação da Vulnerabilidade Ambiental da bacia hidrográfica do rio Piedade, MG. Monografia. Uberlândia, Universidade Federal de Uberlândia. 49pp.

PISANI, R. J.; ALVES, G. M. R. Análise multitemporal da expansão urbana do município de Taubaté-SP entre os anos de 1986 a 2016. Revista Cerrados, v.16, n.1, p. 23-39, 2018.

REBELO, FERNANDO. Riscos naturais e ação antrópica: estudos e reflexões. Imprensa da Universidade de Coimbra/Coimbra University Press, 2003.

RODRIGUES, T. M. B.; GOMES S.E. S. (2012). Análise dos problemas de drenagem urbana na av. Miguel Rosa no trecho do centro comercial em Teresina-Pi. Instituto Federal do Piauí, Teresina.

ROSA, ROBERTO; BRITO, JORGE LUIS SILVA. Introdução ao geoprocessamento. UFU: Apostila. Uberlândia, 2013.

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

SAATY, T. L. Some Mathematical Concepts of the Analytic Hierarchy Process Behaviormetrika, v. 29, 1991.

SAATY, T. L. Fundamentals of decision making and priority theory with the analytic hierarchy process. Pittsburgh, PA: RWS Publications, 1994.

SANTOS, CLAUDIA BENEDITA DOS et al. Utilização de um Sistema de Informação Geográfica para descrição dos casos de tuberculose. Boletim de Pneumologia Sanitária, v. 12, n. 1, p. 07-12, 2004.

SANTOS, A. R. et al. ARCGIS 9.3 total: aplicações para dados espaciais. Alegre, CAUFES. 184pp, 2010.

SARDINHA, Diego de Souza et al. Base de dados de desastres naturais no município de Poços de Caldas/MG: ferramenta para o planejamento e a gestão territorial. urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana, v. 8, p. 318-331, 2016.

SCHNAID, Fernando; ODEBRECHT, Edgar. Ensaios de Campo e suas aplicações à Engenharia de Fundações: 2ª edição. Oficina de Textos, 2012.

SEVERIANO, ANA VALENTINA DE PAULO RIBEIRO et al. O uso da sondagem em projetos de fundações: The use of survey in foundation projects. Brazilian Journal of Animal and Environmental Research, v. 5, n. 3, p. 2934-2947, 2022.

SILVA, GEAN CARLOS FERREIRA; AZEVEDO, RAFAEL BATISTA. Avaliação da sondagem SPT via estudo de caso. 2021.

SOUZA, L.A.P. DA; SILVA, R.F. DA; LYOMASA, W.S. Métodos de Investigação. In: OLIVEIRA, A.M. dos S.; BRITO, S.B.A. de (Ed.) Geologia de engenharia. São Paulo: ABGE, 1998. Cap. 11, p. 163-196.

SRIVASTAVA, R. M. Describing spatial variability using geostatistics analysis. In: SRIVASTAVA, R. M.; ROUHANI, S.; CROMER, M. V.; JOHNSON, A. I.; DESBARATS, A. J. (Ed.). Geostatistics for environmental and geotechnical applications. West Conshohocken: ASTM, 1996. p. 13-19. http://dx.doi.org/10.1520/STP16110S.

TEIXEIRA, A. H. Projeto e execução de fundações. Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia, SEFE, São Paulo/SP, 1996, v.1, p.33-50.

TERZAGHI, K. Mechanism of Landslides, Tradução: Mecanismos de Escorregamento de Terra, Tradução de E. Pichler. Departamento de Livros e Publicações do Grêmio Politécnico, São Paulo, 1967, 41 p., 1950

TERZAGHI, K. E PECK, R. B., Soil Mechanics in Engineering Practice, John Wiley and Sons, New York, 1948.

Tonus, B. P. A. Estabilidade de taludes: avaliação dos métodos de equilíbrio limite aplicados a uma encosta coluvionar e residual da Serra do Mar Paranaense. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

THE UNITED NATIONS INTERNATIONAL STRATEGY FOR DISASTER REDUCTION – UNISDR. (2013). Terminology on disaster risk reduction. Geneva: UNISDR, 2013. Acesso em 8 de Julho de 2024. Disponível em: http://www.unisdr.org.

VARNES, D. J. Slope Movement and Types and Processes, In: Schuster, R. L.; Krizek, R. J. (eds.), Landslides, Analysis and Control. Transportation Research Board Special Report 176, National Academy of Sciences, Washington D. C., p. 11-33, 1978.

VAZ, ANA PAULA DE MELO E SILVA. Estudo de áreas suscetíveis a escorregamento em sub-bacia do Rio São João, Br 376 entre os km 665 e 668. 2014.

VIEIRA, ANTONIO FÁBIO GUIMARÃES. Desenvolvimento e distribuição de voçorocas em Manaus (AM): principais fatores controladores e impactos urbano-ambientais. (Tese de doutorado). Florianópolis: UFSC/CFH, 2008.

ZAIDAN, R.T. Geoprocessamento Conceitos e Definições. Revista de Geografia – PPGEO - UFJF. Juiz de Fora, v.7, n.2, (Jul-Dez) p.195-201, 2017.

ZAMBON, K. L. et al. Análise de decisão multicritério na localização de usinas termoelétricas utilizando SIG. Revista Pesquisa Operacional, Rio de Janeiro, v.25, n.2, p.183-199, 2005.