UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CAMPUS DE ENGENHARIAS E CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CURSO DE ENGENHARIA DE AGRIMENSURA

IARA CARLA DA SILVA SANTOS

ANÁLISE DA FRAGILIDADE DO SISTEMA DE DRENAGEM PLUVIAL URBANA E SUAS IMPLICAÇÕES NA ESTABILIDADE DOS TALUDES VIÁRIOS: O CASO DA AVENIDA PIERRE CHALITA

Rio Largo, Alagoas.
2025

IARA CARLA DA SILVA SANTOS

ANÁLISE DA FRAGILIDADE DO SISTEMA DE DRENAGEM PLUVIAL URBANA E SUAS IMPLICAÇÕES NA ESTABILIDADE DOS TALUDES VIÁRIOS: O CASO DA AVENIDA PIERRE CHALITA

Trabalho de Conclusão de Dissertação apresentado ao Curso de Engenharia de Agrimensura da Universidade Federal de Alagoas, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharelado em Engenharia de Agrimensura.

Orientadora: Prof.ª Dr. Rafaela Faciola Coelho de Souza.

Rio Largo, AL.

2025

Catalogação na Fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Campus de Engenharias e Ciências Agrárias
Bibliotecário Responsável: Erisson Rodrigues de Santana - CRB4 - 1512

S237a Santos, Iara Carla da Silva.

Análise da fragilidade do sistema de drenagem pluvial urbana e suas implicações na estabilidade dos taludes viários: o caso da avenida Pierre Chalita. / Iara Carla da Silva Santos. – 2025.

78 f.: il.

Orientador(a): Rafaela Faciola Coelho de Souza.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Agrimensura) – Graduação em Engenharia de Agrimensura, Campus de Engenharias e Ciências Agrárias, Universidade Federal de Alagoas. Rio Largo, 2025.

Inclui bibliografia

1. Sistema de drenagem pluvial. 2. Índice de fragilidade do sistema. 3. Avenida Pierre Chalita. 4. Estabilidade de talude. I. Título.

CDU: 528.8

Folha de Aprovação

IARA CARLA DA SILVA SANTOS

Análise da fragilidade do sistema de drenagem pluvial urbana e suas implicações na estabilidade dos taludes viários: o caso da Avenida Pierre Chalita

Monografia apresentada ao curso de Engenharia de Agrimensura da Universidade Federal de Alagoas, como requisito parcial para obtenção do título de bacharel Engenharia de Agrimensura.

Aprovado em: 22/05/2025

Banca examinadora:

Documento assinado digitalmente
gov.br RAFAELA FACIOLA COELHO DE SOUZA FERREIR
Data: 03/06/2025 18:07:15-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

_____

(Prof.ª Dr.ª, Rafaela Faciola Coelho de Souza, Universidade Federal de Alagoas) (Orientadora)

Documento assinado digitalmente
gov.br JHONATHAN GOMES DOS SANTOS
Data: 03/06/2025 08:46:30-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

_____

(Prof. Dr., Jhonathan Gomes dos Santos, Universidade Federal de Alagoas)

Documento assinado digitalmente
gov.br JUCIELA CRISTINA DOS SANTOS
Data: 03/06/2025 09:07:41-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

_____

(Prof.ª Dr.ª, Juciela Cristina dos Santos, Universidade Federal de Alagoas)

Dedico este trabalho a todos que sonham e persistem, mesmo diante das dificuldades. À inha família e amigos, que sempre foram minha base e minha motivação para continuar.

AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente a Deus, por nunca me abandonar e por me conceder forças e sabedoria em cada etapa dessa caminhada. À minha mãe, Maria José, que nunca mediu esforços físicos e financeiros para o início desse sonho, sempre acreditando em mim e me apoiando incondicionalmente. Sem ela, essa jornada não teria sido possível.

Aos meus avós maternos, Antônio e Sebastiana, por me acolherem durante o período acadêmico, fazendo o que podiam e o que não podiam para que eu conseguisse ir às aulas. Em especial ao meu avô Antônio, que não conseguiu estar presente na realização deste sonho, mas que continuou me dando forças do céu.

Aos meus avós paternos adotivos, José Pedro e Rosa Maria, que, apesar da distância imposta pela universidade, nunca deixaram de me apoiar e me amar. Em especial ao meu avô José Pedro, que também não conseguiu estar presente para ver a realização deste sonho.

À minha avó paterna de sangue, Denise, que me acolheu por um bom tempo para que eu pudesse ficar mais perto da universidade, me apoiou e se enche de orgulho ao falar que terá uma neta engenheira.

Aos demais familiares, minha enorme gratidão, que sempre me ajudaram a me tornar quem sou hoje e a ter força de vontade para realizar meus sonhos.

Aos meus amigos de Campo Alegre, que acompanharam essa trajetória e conseguiram tornar o fardo da universidade mais leve, deixo minha gratidão.

Aos amigos e colegas profissionais Bruna, Magda, Edigar, Verimundo, Tainan, Valdo, minha eterna gratidão. Suas orientações, parcerias e exemplos foram essenciais na minha formação pessoal e profissional.

Agradeço à professora Regla Toujaguez, por me acolher em seu laboratório durante boa parte da graduação e compartilhar conhecimentos que levarei para a vida.

Ao professor Ravi, que me incentivou e deu suporte na participação em projetos de pesquisa, meu reconhecimento e apreço.

Aos professores Jhonatan e Juciela, que gentilmente disponibilizaram seus equipamentos para que eu pudesse realizar este trabalho de conclusão de curso, muito obrigada.

E à minha orientadora, professora Rafaela, minha gratidão mais especial. Obrigada por me guiar com paciência e compromisso, e por nunca soltar a minha mão ao longo desta trajetória.

“O sucesso é a soma de pequenos esforços repetidos dia após dia.” (Robert Collier, 1941)

RESUMO

Este estudo analisa a fragilidade do sistema de drenagem da Avenida Pierre Chalita e suas implicações na estabilidade dos taludes viários. A pesquisa foi baseada na aplicação do Índice de Fragilidade do Sistema (IFS), com o objetivo de identificar falhas no sistema de drenagem e entender como essas deficiências afetam a estabilidade dos taludes, especialmente em períodos de chuvas intensas. Para isso, foram realizados aerolevamentos com LiDAR, além da coleta e análise de dados geográficos, geológicos e topográficos. Foram elaborados mapas temáticos (hipsométrico, declividade e geológico) e analisado o perfil geométrico da via, com definição de Pontos de Interesse (PI) baseados nas falhas observadas. A estabilidade dos taludes foi analisada por imagens de satélite. Os resultados mostraram que o sistema de drenagem apresenta falhas significativas, com altos índices de fragilidade, refletindo a ineficiência no manejo das águas pluviais e a vulnerabilidade dos taludes. Foram propostas intervenções técnicas para melhorar a drenagem e aumentar a estabilidade, como a implementação de sistemas eficientes de escoamento e monitoramento contínuo da estabilidade geotécnica. O estudo destaca a importância de um planejamento urbano integrado, com foco na segurança viária e na sustentabilidade da região.

Palavras-chave: Sistema de drenagem pluvial; Índice de fragilidade do sistema; Avenida Pierre Chalita; Estabilidade de talude.

ABSTRACT

This study analyzes the fragility of the drainage system on Avenida Pierre Chalita and its implications for the stability of the road embankments. The research was based on the application of the System Fragility Index (IFS), aiming to identify faults in the drainage system and understand how these deficiencies affect the stability of the embankments, especially during periods of heavy rainfall. LiDAR-based airborne surveys were conducted, along with the collection and analysis of geographical, geological, and topographical data. Thematic maps (hypsometric, slope, and geological) were created, and the geometric profile of the road was analyzed, defining Points of Interest (PI) based on observed failures. The stability of the embankments was assessed using satellite imagery. The results showed that the drainage system has significant flaws, with high fragility indices, reflecting inefficiency in stormwater management and embankment vulnerability. Technical interventions were proposed to improve drainage and enhance stability, such as implementing efficient runoff systems and continuous geotechnical stability monitoring. The study highlights the importance of integrated urban planning, focusing on road safety and the sustainability of the area.

Keywords: Stormwater drainage system; System fragility index; Pierre Chalita Avenue; Slope stability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Representação de alguns elementos de medidas estruturais. 19
Figura 2 – Principais tipos de movimentos de massa. 21
Figura 3 – Estrutura de um talude 22
Figura 4- Composição das camadas em um SIG 30
Figura 5 – Fluxograma metodológico. 33
Figura 6 – Mapa de identificação do Pontos de Interesse (PI) 21
Figura 7 – Mapa hipsométrico da bacia hidrográfica do Rio Jacarecica. 14
Figura 8 – Depósito irregular de lixo encontrado próximo ao Ponto 2. 14
Figura 9 – Mapa Hipsométrico da região da Avenida Pierre Chalita. 14
Figura 10 – Mapa de declividade da região da Avenida Pierre Chalita. 14
Figura 11 – Mapa das unidades Litoestratigráficas da região de estudo 14
Figura 12 – Perfil de elevação gerado pelo software Google Earth Pro. 14
Figura 13 – Perfil de elevação gerado pela ferramenta "Terrain Profile". 15
Figura 14 – Indício de urbanização irregular próximo ao bordo da via e evidencia de cortes, indicadas por setas vermelhas 16
Figura 15 – Indicadores encontrados do início da via ao Ponto de Interesse 01. 17
Figura 16 - Movimento de terra registrado 18
Figura 17 – Indicadores encontrados entre os Pontos de Interesses 02 e 03. 18
Figura 18- Lançamentos de efluente identificado na ortofoto. 19
Figura 19 – Indicadores encontrados entre os Pontos de Interesses 03 e 04. 20
Figura 20 – Indicadores encontrados entre os Pontos de Interesses 04 e 05. 21
Figura 21 – Indicadores encontrados entre os Pontos de Interesses 05 e 06. 22
Figura 22 – Indicadores encontrados entre o Ponto de Interesse 06 até o fim da via. 23
Figura 23 – Registro de alagamento (2021). 24
Figura 24 - Mapa da representação dos trechos com o grau de fragilidade geral. 14
Figura 25 – Variação do relevo dos Pontos 01, 02 e 03, antes da implantação da via em 2010. 15
Figura 26 – Variação do relevo dos Pontos 01, 02 e 03, depois da implantação da via em 2013. 16
Figura 27 – Variação do relevo dos Pontos 04, 05 e 06, antes da implantação da via em 2010. 17
Figura 28 – Variação do relevo dos Pontos 04, 05 e 06, depois da implantação da via em 2013. 17

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Índice Geral de Fragilidade. 26

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Fatores intervenientes no sistema de drenagem pluvial urbano. 26
Tabela 2– Indicadores de Fragilidade do Sistema – IFS: naturezas, indicadores e abordagens. 28
Tabela 3 – Valores adotados para manifestação dos indicadores. 29
Tabela 4 – Graus e intervalos de fragilidade. 29
Tabela 5 – Intervalos de Declividade com respectivas denominações das classes. 17
Tabela 6 – Índices de Fragilidade no Sistema para os Pontos de Interesse (PI). 25
Tabela 7 – Ações recomendadas. 18
Tabela 8 – Resumo das ações propostas por PI's. 20

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
DUS	Drenagem Urbana Sustentável
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IFG	Índice Geral de Fragilidade
IFS	Indicadores de Fragilidade do Sistema
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima
LiDAR	Light Detection and Ranging
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDT	Modelo Digital do Terreno

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 15

1.1 Objetivos 17

2. REFERENCIAL TEÓRICO 18

2.1 Sistema de drenagem urbana 18

2.2 Taludes viários e estabilidade 20

2.3 Métodos de Avaliação dos Sistemas de Drenagem Urbana (SDU) 24

2.4 O geoprocessamento como ferramenta de análise do SDU 29

2.5 Uso de sistema de levantamento a Laser Aerotransportado para criação de MDT 31

3 METODOLOGIA 33

3.1 Tipo de pesquisa 33

3.2 Delimitação da área de estudo 33

3.3 Coleta de dados para caracterização da área de estudo 14

3.4 Elaboração e Análise de Mapas temáticos 15

3.4.1 Mapa Hipsométrico 16

3.4.2 Mapa de Declividade 16

3.4.3 Mapa Geológico 17

3.5 Análise do perfil geométrico da via 17

3.6 Definição dos Pontos de Interesse (PI) 18

3.7 Metodologia apoiada em Indicadores de Fragilidade do Sistema (IFS) 18

3.8 Análise da vulnerabilidade dos taludes por imagem de satélite 19

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 21

4.1 Definição dos Pontos de Interesse 21

4.2 Características identificadas na área de estudo 22

4.2.1 Mapas hipsométricos 22

4.2.2 Mapa de Declividade 14

4.2.3 Mapa Geológico 14

4.2.4 Visualização do perfil geométrico da via 14

4.3 Diagnóstico dos Pontos de Interesse (PI's) 15

4.3.1 Ponto de Interesse 01 15

4.3.2 Ponto de Interesse 02 17

4.3.3 Ponto de Interesse 03 19

4.3.4 Ponto de Interesse 04 20

4.3.5 Ponto de Interesse 05 21

4.3.6 Ponto de Interesse 06 22

4.4 Análise geral dos resultados 24

4.5 Identificação visual das vulnerabilidades dos taludes 15

4.6 Propostas de solução 18

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS 21

REFERÊNCIAS 24

1. INTRODUÇÃO

A crescente urbanização das cidades brasileiras tem provocado impactos significativos nos sistemas de infraestrutura urbana, sobretudo no que se refere à drenagem pluvial. O aumento das áreas impermeabilizadas, a ocupação irregular de encostas e a deficiência em planejamento e manutenção do sistema de escoamento das águas pluviais contribuem diretamente para a ocorrência de inundações, erosões e instabilidade de taludes (TUCCI, 2002; BAPTISTA, 2004).

A drenagem pluvial urbana, quando inadequada, agrava ainda mais os riscos geotécnicos, sobretudo em vias localizadas em regiões de relevo acidentado. Isso ocorre porque o acúmulo ou a infiltração descontrolada da água pluvial nos taludes reduz a resistência do solo ao cisalhamento, favorecendo processos de deslizamento e instabilização (MASSAD, 2009; PINTO, 2006). Assim, há uma relação direta entre a eficiência do sistema de drenagem urbana e a segurança das estruturas de contenção e mobilidade urbana.

No município de Maceió (AL), a Avenida Pierre Chalita constitui um caso representativo dessa problemática. Situada em uma área de topografia acidentada, a via apresenta trechos com taludes elevados e cortes profundos, que requerem um sistema de drenagem eficaz para garantir sua estabilidade. Contudo, segundo informações disponibilizadas no site da Prefeitura, ao longo dos últimos anos, a via tem registrado episódios recorrentes de escorregamentos e alagamentos, frequentemente associados à deficiência na drenagem (MACEIÓ, 2022).

Dantas, Tavarez e Marques (2022), afirmam que a interferência humana no meio ambiente, por vezes acaba gerando problemas para a gestão pública local, isso se dá às intervenções voltadas ao melhoramento da mobilidade urbana por meio de abertura de vias, provocando prejuízos financeiros para a prefeitura municipal e aos cidadãos que fazem uso dela.

O Estatuto da Cidade, criado pela Lei Federal nº 10.257 (2001), oferece diretrizes para promover o crescimento das cidades de forma mais justa e equilibrada. Essas diretrizes sugerem a utilização de instrumentos de planejamento e gestão, que ajudam a compreender e melhorar o funcionamento da cidade.

Esses instrumentos, têm por objetivo avaliar o estado atual e as condições da cidade, realizando uma análise da funcionalidade e desempenho dos evidentes problemas na localidade, servindo como bússola para solucioná-los.

De acordo com Souza (2013), a gestão da drenagem urbana no Brasil é particularmente desafiadora, devido à falta de planejamento adequado e à negligência nas políticas públicas. Essa ausência de ações estruturantes contribui para a perpetuação dos problemas de infraestrutura, tornando a melhoria das condições urbanas um processo ainda mais difícil e demorado.

Essas deficiências no sistema de escoamento resultam em infiltração excessiva nos taludes, o que provoca a saturação do solo, aumento da pressão neutra nos poros e perda de resistência ao cisalhamento, fatores determinantes para o surgimento de rachaduras, escorregamentos e colapsos parciais da estrutura viária (MASSAD, 2009; PINTO, 2006).

Em 2019 e 2022, episódios de deslizamentos de terra na Avenida Pierre Chalita obrigaram a interdição parcial da via e acionaram obras emergenciais de contenção e drenagem (G1 ALAGOAS, 2022).

A situação da Avenida Pierre Chalita evidencia a necessidade de integração entre os sistemas de drenagem urbana e as técnicas de contenção de taludes, especialmente em regiões sujeitas a altos índices pluviométricos e há relevo muito ondulado.

Como argumentam Coelho e Fernandes (2015), a falta de um planejamento técnico e multidisciplinar na drenagem compromete não só a estabilidade estrutural da via, mas também a segurança da população e a sustentabilidade urbana.

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo analisar a fragilidade do sistema de drenagem pluvial urbana da Avenida Pierre Chalita e suas implicações na estabilidade dos taludes viários. A pesquisa propõe-se a diagnosticar as deficiências existentes, compreender os fatores que contribuem para a instabilidade da via e apontar diretrizes técnicas para intervenções mais eficientes e sustentáveis. Para tanto, utiliza-se a metodologia desenvolvida por Jardim da Silva et al. (2004), a qual se baseia em Indicadores de Fragilidade do Sistema (IFS)

Esta pesquisa viabiliza ainda uma discussão dos limites da engenharia urbana convencional diante de áreas de risco geotécnico e mudanças climáticas, exigindo soluções inovadoras e políticas públicas voltadas à manutenção preventiva e ao monitoramento contínuo dessas infraestruturas.

1.1 Objetivos

Geral:

Analisar a fragilidade do sistema de drenagem da Avenida Pierre Chalita e suas implicações nos taludes viários.

Específicos:

- Identificar as patologias e deficiências no sistema de drenagem da área estudada a partir de interpretações fotogramétricas;
- Utilizar o IFS para avaliar as deficiência do sistema de drenagem existente;
- Avaliar a relação das deficiências no sistema de drenagem com a instabilidade dos taludes às margens da via;
- Sugerir soluções técnicas para mitigar as deficiências identificadas.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Sistema de drenagem urbana

Segundo Tucci (2012), os sistemas de drenagem urbana são comumente subdivididos em dois subsistemas principais: microdrenagem e macrodrenagem. Esses sistemas são distintos quanto aos seus objetivos e critérios de planejamento, mas atuam de forma articulada no controle e direcionamento das águas pluviais nas áreas urbanizadas. A adequada integração entre ambos é essencial para a funcionalidade e a segurança dos centros urbanos frente a eventos pluviométricos intensos.

A microdrenagem se refere ao conjunto de dispositivos responsáveis pela captação inicial e condução das águas provenientes de áreas impermeabilizadas, como telhados, calçadas e vias públicas. Já a macrodrenagem é composta por estruturas de maior porte, destinadas a receber os volumes coletados pela microdrenagem e conduzi-los até os corpos hídricos naturais, como córregos e rios (MIGUEZ et al., 2016).

Conforme Silva (2016), essa etapa do sistema lida com escoamentos mais concentrados, geralmente em áreas de fundo de vale ou em regiões sujeitas a alagamentos, sendo fundamental para o escoamento seguro de grandes volumes d’água. Por isso, seu dimensionamento deve considerar cenários extremos, como os provocados por chuvas intensas e recorrentes.

Para Tucci (2008), a drenagem pluvial desempenha um papel essencial na infraestrutura urbana, pois garante o escoamento adequado das águas da chuva, prevenindo alagamentos, processos erosivos e danos à população. No entanto, a urbanização acelerada e a crescente impermeabilização do solo têm provocado um aumento expressivo no volume e na velocidade do escoamento superficial, intensificando os riscos de enchentes e os impactos ambientais associados.

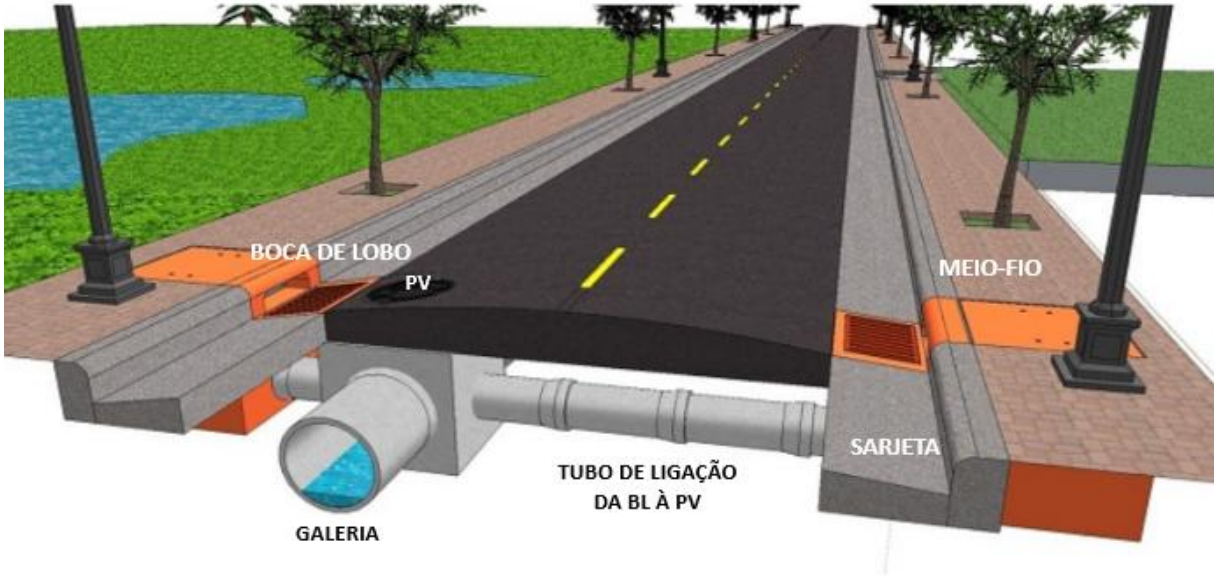
Além disso, Tucci (2002), descreve que a drenagem urbana tradicional se baseia em sistemas de canalização subterrânea, que buscam remover rapidamente a água da chuva para fora das áreas urbanas. No entanto, essa abordagem tem se mostrado limitada, pois transfere o problema para jusantes, além de contribuir para a degradação dos corpos hídricos.

Já para Baptista (2004), a expansão das áreas urbanizadas, com o aumento de superfícies impermeáveis, reduz a capacidade de infiltração da água no solo e contribui para a intensificação das cheias urbanas, sobretudo quando aliada ao descarte inadequado de resíduos sólidos que comprometem a drenagem.

Diante desses desafios, surgem soluções alternativas e sustentáveis para a drenagem urbana, tais como: o uso de telhados verdes, pavimentos permeáveis, jardins de chuva e bacias de detenção, as quais são técnicas que visam integrar o escoamento pluvial ao ciclo hidrológico natural, promovendo retenção, infiltração e tratamento das águas pluviais (Cettner et al., 2012). Esses métodos fazem parte do conceito de Drenagem Urbana Sustentável (DUS), que propõe uma abordagem mais integrada e ecológica à gestão das águas urbanas.

Bellé (2011), descreve essas soluções como medidas estruturais e não estruturais, sendo uma medida não estrutural medidas que auxiliam no planejamento urbano da região, e as estruturantes correspondendo as estruturas implantas pela engenharia, como sarjeta, boca de lobo, galerias, entre outros, como representado na Figura 1.

Figura 1- Representação de alguns elementos de medidas estruturais.



Fonte: Adaptado de Moraes (2013).

Tucci et al (1997), consegue descrever os principais termos e componentes utilizados para um dimensionamento de sistema de drenagem pluvial.

- **Galeria:** canalizações que conduzem as águas pluviais provenientes das bocas-de-lobo e das ligações privadas;
- **Poço de Visita (PV):** dispositivos localizados em pontos convenientes do sistema de galerias que permitem mudança de direção, de declividade, de diâmetro e inspeção e limpeza das canalizações;
- **Trecho:** porção de galeria situada entre dois poços de visita

- **Boca-de-lobo (BL):** dispositivos que captam águas pluviais transportadas pelas sarjetas;
- **Tubos de ligações:** canalizações que conduzem as águas pluviais captadas nas bocas-de-lobo para as galerias ou poços de visita;
- **Meio-fio:** elementos de concreto, assentados entre o passeio e a via pública, paralelamente ao eixo da rua;
- **Sarjetas:** faixas de via pública, paralelas e vizinhas ao meio-fio. A valeta formada é a receptora das águas pluviais que caem sobre as vias públicas e que para elas escoam;
- **Sarjetões:** calhas localizadas nos cruzamentos de vias públicas, formadas pela sua própria pavimentação e destinadas a orientar o fluxo das águas que escoam pelas sarjetas;
- **Condutos forçados:** obras destinadas à condução das águas superficiais coletadas, sem preencher completamente a seção transversal dos condutos;
- **Estações de bombeamento:** conjunto de obras e equipamentos destinados a retirar água de um canal de drenagem, quando este não possuir mais condições de escoamento por gravidade.

Miguez e Veról (2014) destacam que a gestão eficaz da drenagem pluvial depende do planejamento integrado da bacia hidrográfica, associando aspectos urbanísticos, ambientais e sociais. O envolvimento da população, a fiscalização de áreas de risco e o uso de instrumentos de planejamento urbano são estratégias essenciais para a resiliência das cidades frente às mudanças climáticas.

O último relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2022) alerta para o aumento da frequência de eventos extremos, como chuvas intensas, o que reforça a necessidade urgente de adaptar os sistemas de drenagem urbana, considerando soluções baseadas na natureza e políticas públicas eficientes.

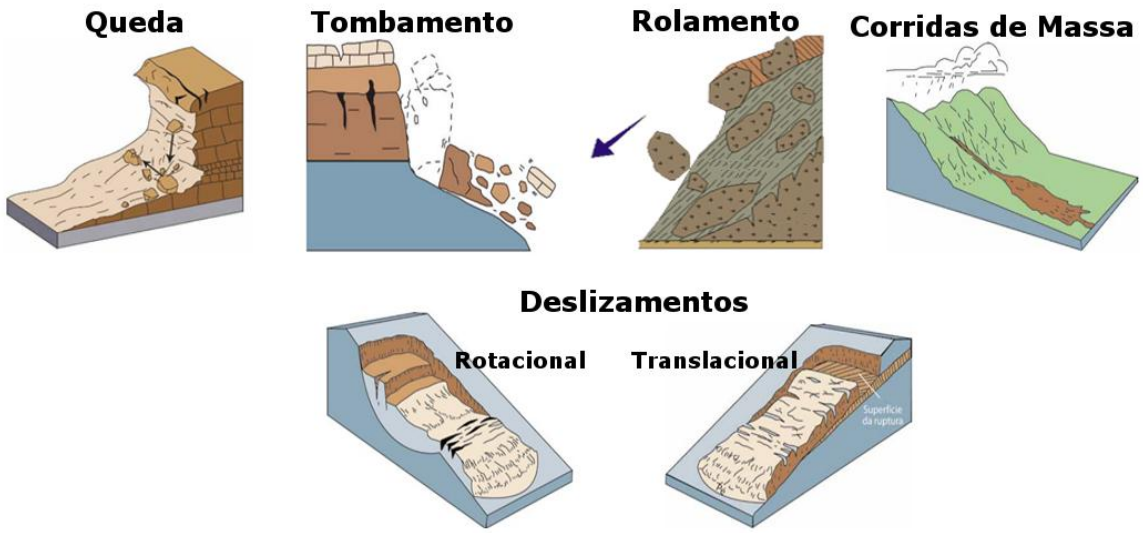
2.2 Taludes viários e estabilidade

De acordo com Bastos et al. (2010), a instabilidade de taludes pode ocorrer devido a fatores como a ação da água, características do solo, vibrações provocadas pelo tráfego, variações climáticas e alterações no entorno. A presença de água, especialmente, é um dos

principais fatores de instabilização, pois reduz a coesão entre partículas e aumenta o peso do solo, favorecendo deslizamentos.

Esses eventos caracterizam-se como movimentos de massa gravitacionais que ocorrem nos taludes, manifestando-se por meio de diferentes processos, tais como rastejo, escorregamentos, quedas e corridas, ilustrados na Figura 2. Cada um desses mecanismos está associado a condições específicas de instabilidade e contribui para a evolução e degradação das encostas (Augusto Filho, 1992).

Figura 2 – Principais tipos de movimentos de massa.



Fonte: Compilada e adaptada de Higland e Bobrowsky (2008).

Os movimentos de massa em encostas podem ocorrer de diversas formas, sendo classificados conforme a velocidade e o tipo de material envolvido. O rastejo é um movimento lento e contínuo do solo ao longo do talude, sem formar uma superfície de ruptura. Esse movimento de massa pode ser causado por cortes no terreno, pisoteio de animais, crescimento de raízes ou escavações feitas por animais, afetando desde pequenas edificações até grandes estruturas, podendo anteceder escorregamentos (Oliveira, 2010).

Já os escorregamentos são movimentos rápidos com superfície de ruptura bem definida e volumes variados. São geralmente provocados pela infiltração da água da chuva, que reduz a resistência do solo, e podem ser agravados por desmatamentos, variações no lençol freático e erosão. Os movimentos rápidos se dividem em escorregamentos planares (translacionais) e circulares (rotacionais) (Roque, 2013).

A queda de blocos e tombamentos ocorre em encostas íngremes, com rochas ou matacões que se desprendem por perda de apoio, erosão ou saturação do solo. Já as corridas de

massa são os movimentos mais rápidos e envolvem grandes volumes de solo ou rocha misturados à água, com grande poder destrutivo, alcançando longas distâncias, inclusive em áreas planas (Oliveira, 2010).

É importante entender a diferença entre talude e encosta, explorada por Gerscovich (2009), que descreve que o talude é qualquer superfície inclinada de solo ou rocha, podendo ser natural ou construída pelo ser humano, como em cortes e aterros, já as encostas são consideradas taludes naturais, formadas pela decomposição das rochas no próprio local, pela ação da gravidade ou pela combinação desses materiais.

A análise da estabilidade de taludes é geralmente realizada com base em métodos geotécnicos, que incluem modelagens numéricas, análises de equilíbrio limite e estudos de tensões e deformações. Segundo Massad (2009), os métodos mais utilizados são os de equilíbrio limite, que permitem calcular o fator de segurança do talude, indicando a sua probabilidade de colapso.

A estabilização de taludes viários é uma prática multidisciplinar que exige a integração de conhecimentos da geotecnia, engenharia civil, hidrologia e meio ambiente. Portanto, o planejamento adequado e a manutenção contínua são fundamentais para prevenir acidentes e garantir a funcionalidade das rodovias a longo prazo (Pinto, 2006).

Dessa forma, os taludes são estruturas inclinadas formadas pela escavação (taludes de corte) ou pelo empilhamento de material (taludes de aterro), comumente utilizados em obras de infraestrutura, como rodovias, ferrovias e barragens. Essas estruturas visam permitir a adaptação das vias ao relevo natural, garantindo a funcionalidade da obra e a estabilidade do terreno (Massad, 2009). A Figura 3 apresenta uma estrutura usualmente adotada.

Figura 3 – Estrutura de um talude



Fonte: Adaptado de Scoz, 2002.

Sendo assim, a estabilidade de taludes refere-se à sua capacidade de resistir a movimentos de massa e permanecer em equilíbrio, mesmo quando submetidos a ações externas,

como variações climáticas, tráfego intenso ou mudanças nas condições geotécnicas do solo. Essa estabilidade pode ser seriamente comprometida por sistemas de drenagem inadequados, que permitem o acúmulo ou a infiltração excessiva de água no solo (Coelho; Fernandes, 2015).

Uma vez que a água infiltrada aumenta o peso próprio do solo, o que gera maior força atuando em direção ao plano de ruptura, favorecendo deslizamentos. Em solos coesivos e pouco permeáveis, a saturação reduz rapidamente a capacidade de suporte, podendo desencadear movimentos de massa mesmo sob pequenas elevações do nível freático (Massad, 2009).

A infiltração da água em taludes mal drenados representa uma das principais causas de instabilidade. Quando a água penetra no solo sem controle, ocorre o aumento da pressão neutra nos poros, reduzindo a tensão efetiva e, consequentemente, a resistência ao cisalhamento, essencial para manter o talude estável (Pinto, 2006).

A perda da estabilidade dos taludes pode resultar em movimentos de massa gravitacionais, como os deslizamentos de terra, os quais implicam em consequências críticas a exemplo do bloqueio completo de vias públicas, a interrupção de serviços essenciais e, principalmente, a ameaça à vida humana.

Conforme Bastos et al. (2010), deslizamentos causados por drenagem ineficaz têm se tornado cada vez mais frequentes, especialmente em rodovias situadas em regiões com chuvas intensas e relevo acidentado. Além dos danos físicos, os impactos incluem: comprometimento da mobilidade urbana e rodoviária; danos à infraestrutura rodoviária e sistemas de drenagem; custos elevados de manutenção e reconstrução; riscos à integridade física de motoristas e pedestres.

Sendo assim, existem diferentes alternativas que são utilizadas na engenharia geotécnica para a implantação de sistemas de drenagem eficientes. As canaletas, os drenos horizontais, drenos profundos, e os revestimentos vegetais são metodologias aplicadas em projetos para evitar o acúmulo de água e preservar a integridade dos taludes.

Segundo Oliveira e Amaral (2017), práticas como a revegetação auxiliam na proteção superficial do solo e na redução da erosão pluvial, contribuindo também para a estabilidade geotécnica da estrutura.

Além disso, a escolha de técnicas de contenção e estabilização deve considerar a natureza do material envolvido, a altura do talude, o grau de inclinação e as condições hidrológicas locais. Entre as soluções comumente empregadas estão os muros de arrimo, solo grampeado, gabiões, drenagens internas e revestimentos vegetais (Coelho; Fernandes, 2015).

A vegetação desempenha um papel importante na proteção superficial e no controle da erosão de taludes. Segundo Oliveira e Amaral (2017), a revegetação contribui não apenas para

a estabilização superficial, mas também para a recuperação ambiental da área, promovendo maior integração com o ecossistema local.

2.3 Métodos de Avaliação dos Sistemas de Drenagem Urbana (SDU)

A avaliação dos Sistemas de Drenagem Urbana (SDU) é de suma importância para garantir sua eficiência no gerenciamento de águas pluviais e mitigar os efeitos adversos da urbanização. Conforme Teixeira et al. (2020), uma avaliação eficaz ajuda a identificar áreas de melhoria e implementar estratégias para enfrentar os desafios ambientais, legais e econômicos associados à drenagem urbana.

Sem uma avaliação adequada, os sistemas de drenagem podem não funcionar de maneira ideal, levando ao aumento dos riscos de inundação, danos à propriedade e problemas de saúde pública. Deste modo, a eficiência do sistema depende da sua manutenção contínua e de uma abordagem integrada com o planejamento urbano (Tucci, 2008).

Eventos extremos de precipitação estão se tornando mais frequentes e intensos devido às mudanças climáticas, o que ressalta a necessidade de avaliar o desempenho e identificar vulnerabilidades nos sistemas de drenagem existentes (Rodrigues; Silva Junior; Lima, 2024).

De acordo com Guerra et al. (2012), a intensificação dos eventos pluviométricos impõe aos sistemas de drenagem urbana a necessidade de maior capacidade de adaptação e resiliência diante das novas condições ambientais. Nesse contexto, a avaliação do desempenho desses sistemas sob eventos extremos torna-se essencial para verificar sua eficácia e auxiliar a identificar as vulnerabilidades, incluindo a análise da integridade estrutural, da capacidade hidráulica e da aptidão do sistema para se adaptar às mudanças nas condições hidrológicas e climáticas.

Souza e Mendonça (2019), descreve que o objetivo principal da avaliação dos sistemas de drenagem urbana pode ser utilizado para desenvolver metodologias eficazes para avaliar seu desempenho no gerenciamento do escoamento de águas pluviais e na mitigação dos riscos de inundação.

Rodrigues, Silva Junior e Lima (2024), complementam ao afirmar que identificar vulnerabilidades e propor soluções para melhorar o funcionamento dos sistemas de drenagem é um objetivo crucial do processo de avaliação. Tendo em vista que nas vulnerabilidades podem surgir de vários fatores, incluindo infraestrutura envelhecida, design inadequado, manutenção insuficiente e os impactos das mudanças climáticas.

A identificação dessas vulnerabilidades requer uma avaliação completa dos componentes do sistema, incluindo tubulações, bueiros, bacias de detenção e outras estruturas de drenagem. Essa avaliação deve considerar a integridade estrutural do sistema e sua capacidade hidráulica de lidar com o escoamento de águas pluviais.

Baum e Goldenfum (2021) exploraram o uso de indicadores e índices para o gerenciamento de águas pluviais urbanas no Brasil, por meio de um levantamento bibliográfico e documental de referências sobre o tema. O estudo destacou a importância dos dados que compõem cada indicador, considerando sua aplicabilidade e facilidade de obtenção. Como resultado, foram analisadas 27 referências bibliográficas, sendo a maioria publicada na última década (2010–2020). Além disto, o estudo concluiu que a adoção de indicadores bem estruturados pode ser utilizada na gestão e políticas públicas mais eficazes.

A fragilidade, nesse contexto, refere-se à suscetibilidade de um sistema a impactos adversos ou interrupções, enquanto a resiliência denota sua capacidade de se recuperar de tais eventos e manter funções essenciais. Deste modo, a metodologia IFS fornece uma maneira sistemática de identificar e avaliar essas características, permitindo que os tomadores de decisão entendam os pontos fortes e fracos dos sistemas que gerenciam.

Ao empregar uma variedade de indicadores e técnicas analíticas, o IFS oferece uma visão abrangente da dinâmica do sistema, auxiliando no desenvolvimento de estratégias direcionadas para aumentar a resiliência e mitigar possíveis vulnerabilidades. A aplicação do IFS se estende por vários setores, incluindo planejamento urbano, gestão ambiental e desenvolvimento de infraestrutura, refletindo sua adaptabilidade e ampla utilidade para enfrentar desafios complexos.

Os IFS foram elaborados para aplicação na rede de drenagem no Plano Municipal de Saneamento Ambiental de Alagoinhas – BA e utilizado como um instrumento de planejamento e gestão. Essa abordagem considera o sistema de drenagem como um conjunto de elementos interdependentes, cujo desempenho pode ser alterado por diversos fatores. Por sua vez, esses fatores também sofrem influência do desempenho do sistema, o que gera uma reação em cadeia que compromete a eficiência dos dispositivos de drenagem (Silva, 2004).

A metodologia serviu como uma estrutura estruturada para avaliar a vulnerabilidade e resiliência de vários sistemas, particularmente no contexto de ambientes urbanos. Esta aplicação forneceu uma demonstração prática de sua utilidade para enfrentar os desafios do mundo real e serviu de base para sua posterior adoção em outros contextos.

A metodologia IFS avalia a fragilidade com base em uma abordagem multifacetada, considerando fatores ambientais, técnicos, econômicos, institucionais e sociais, conforme Tabela 1.

Ao considerar esses diversos fatores, o IFS fornece uma visão holística da fragilidade do sistema, permitindo que os tomadores de decisão abordem as causas profundas da vulnerabilidade e desenvolvam soluções abrangentes.

Tabela 1 – Fatores intervenientes no sistema de drenagem pluvial urbano.

Natureza	Fatores	Abordagem
Ambiental	Arranjo do traçado	Interação com topografia, respeito ao sistema natural de drenagem
	Usos do solo	Nível de impermeabilização dos terrenos
		Erodibilidade dos terrenos.
		Ocupação marginal dos corpos interceptores.
	Padrões de conforto das vias	De pedestres.
		De grande fluxo de veículos e de pedestres.
		De grande fluxo de veículos e de baixo fluxo de pedestres.
		De médio movimento.
		De acesso local.
Tecnológico	Interação com demais equipamentos de saneamento urbano	Lançamento de efluentes domésticos na rede
		Lançamento de outros efluentes na rede
		Deposição de lixo nas galerias e canais
		Dispersão de sedimentos nas vias
	Estruturas de microdrenagem	Dimensão dos dispositivos hidráulicos.
		Padrão construtivo.
		Adequação do conjunto de dispositivos.
		Manutenção e conservação dos dispositivos.
	Estruturas de macrodrenagem	Dimensão dos dispositivos hidráulicos.
		Padrão construtivo.
		Adequação do conjunto de dispositivos.
		Manutenção e conservação dos dispositivos.
Institucionais	Aspectos gerenciais	Interatividade de componentes.
		Aporte financeiro no orçamento.
		Recursos humanos.
		Planejamento das ações e estudos existentes.
	Aspectos legais	Existência de normas e outros instrumentos.
		Aplicação dos dispositivos

Fonte: Adaptado de Silva et al., (2004, p. 4).

Explorando os fatores que influenciam a vulnerabilidade do sistema de drenagem, podemos classificá-los em cinco categorias principais:

Fatores ambientais: Refletem as condições naturais e os recursos presentes no ambiente que afetam diretamente a fragilidade do sistema. Esses fatores incluem padrões climáticos (como a intensidade e frequência das chuvas), a topografia da área (que determina a inclinação e o direcionamento do escoamento superficial) e a qualidade da água (que pode influenciar a sedimentação e a eficiência do sistema de drenagem).

Fatores técnicos: Relacionam-se ao planejamento, construção, operação e manutenção da infraestrutura de drenagem. Incluem a qualidade dos projetos de drenagem, a eficiência das redes de drenagem, o desempenho das instalações de tratamento de água pluvial e a capacidade dos sistemas de gerenciamento de resíduos. Deficiências nesses aspectos podem aumentar a vulnerabilidade do sistema, especialmente em períodos de chuvas intensas.

Fatores econômicos: Envolvem os recursos financeiros disponíveis para o desenvolvimento e manutenção do sistema de drenagem. Isso inclui tanto o orçamento para a instalação de novos dispositivos de drenagem quanto os custos operacionais de manutenção. Além disso, fatores econômicos estão relacionados aos custos sociais e materiais causados por falhas no sistema, como alagamentos, danos a propriedades e a interrupção de serviços essenciais.

Fatores institucionais: Referem-se às estruturas de governança, políticas públicas e regulamentos que guiam o gerenciamento da drenagem urbana. Esses fatores incluem a eficácia da gestão pública, a implementação de leis ambientais e a capacidade das instituições responsáveis pela manutenção e fiscalização do sistema de drenagem. A ausência de políticas eficazes pode agravar problemas estruturais no sistema de drenagem.

Fatores sociais: Compreendem aspectos demográficos, culturais e comportamentais da população local. O entendimento da população sobre o funcionamento do sistema de drenagem, as atitudes em relação ao descarte adequado de resíduos e a ocupação do solo em áreas de risco são elementos cruciais. Fatores como crescimento populacional desordenado e construções irregulares também aumentam a pressão sobre o sistema de drenagem, tornando-o mais suscetível a falhas. afetada pelo sistema, incluindo a participação e a conscientização da comunidade.

Esses indicadores são selecionados com base em sua relevância, mensurabilidade e sensibilidade às mudanças no sistema e são usados para quantificar os diferentes fatores que contribuem para a fragilidade. Por exemplo, os indicadores de capacidade de drenagem podem incluir o volume de escoamento de águas pluviais gerenciado, a frequência de eventos de inundação e a condição da infraestrutura de drenagem (Tabela 2).

Tabela 2– Indicadores de Fragilidade do Sistema – IFS: naturezas, indicadores e abordagens.

Natureza	Indicadores e abordagens adotadas
Ambiental	Degradação física dos terrenos: consideram-se terrenos baldios e áreas com maiores declividades, as quais facilitem a produção de sedimentos. Favorecimento da produção de sedimentos: consideram-se locais próximos a áreas verdes, terrenos baldios, áreas com maiores declividades, ou seja, fatores que produzem maior quantidade de sedimentos. Ocorrência de alagamento: áreas onde ocorrem alagamentos. Contribuição para alagamento de outros PIs Deposição de resíduos gerais nas vias públicas: descarte de todos os tipos de resíduos em locais públicos. Assoreamento do corpo receptor: processos ocasionados pelo acúmulo de resíduos, entulho e outros detritos no fundo dos rios. Interferências inadequadas: do sistema de drenagem com lixo, circulação de pedestres e veículos.
Tecnológico	Ineficiência do escoamento nas vias: consideram-se áreas com predominância de planícies, as quais facilitam o alagamento. Ineficiência dos dispositivos de coleta: equivalem aos equipamentos que compõe o sistema de microdrenagem. Interferência inadequada no trânsito de veículos: situação do trânsito de veículos e geral, em meio a um alagamento. Interferência inadequada no movimento de pedestres: deslocamento dos pedestres em meio a um alagamento. Redução da vida útil dos pavimentos e acessos: após a ocorrência de chuvas intensas.
Institucionais	Percepção da população quanto a Administração Pública: perguntas realizadas aos moradores se eles estão satisfeitos com a manutenção e conservação dos dispositivos de drenagem. Elevação dos gastos com manutenção e conservação dos equipamentos públicos: os equipamentos equivalem os elementos de microdrenagem (sarjetas e bocas de lobos) e macrodrenagem (galerias de grande porte, pontilhão, bueiros etc.) Ineficiências operacionais: falta de capacidade de manter o sistema de microdrenagem.

Fonte: Adaptado de Santos Júnior (2014).

Os indicadores de qualidade ambiental podem incluir parâmetros de qualidade da água, níveis de poluição e a saúde dos ecossistemas aquáticos. Os indicadores de vulnerabilidade social podem incluir taxas de pobreza, densidade populacional e prevalência de doenças

transmitidas pela água. Ao integrar esses diversos indicadores, o IFS oferece uma compreensão diferenciada do desempenho do sistema, permitindo que os tomadores de decisão identifiquem áreas específicas de melhoria e acompanhem o progresso ao longo do tempo.

Para uma análise integrada, o autor utiliza uma planilha de avaliação para facilitar a visualização dos fatores intervenientes por meio da atribuição de pesos variando de 0 a 5 (Tabela 3). Os pesos foram definidos com base na adaptação metodológica proposta por Santos Júnior (2013), permitindo a obtenção do grau de fragilidade associado a cada ponto analisado.

Tabela 3 – Valores adotados para manifestação dos indicadores.

Valores (pesos)	Manifestação dos indicadores
0	Indicador inexistência no PE
1	Presente, sem agravante (100%)
2	Pouco agravante (75%)
3	Medianamente agravante (50%)
4	Moderadamente agravante (25%)
5	Ausente, muito agravante (0%)

Fonte: Adaptado de Santos Júnior (2013).

Em seguida, é destacado o Índice de Fragilidade Geral (IFG), expresso em graus de fragilidade que variam de muito baixo a muito forte, de acordo com a somatória dos valores atribuídos às manifestações dos indicadores. Dessa forma, quanto maior a incidência e a intensidade dos indicadores, conforme Tabela 4.

Tabela 4 – Graus e intervalos de fragilidade.

Grau de Fragilidade	Intervalos (IGF)
Muito baixa	0 a 22
Baixa	22 a 44
Média	44 a 66
Forte	66 a 88
Muito Forte	88 a 110

Fonte: Adaptado de Santos Júnior (2013).

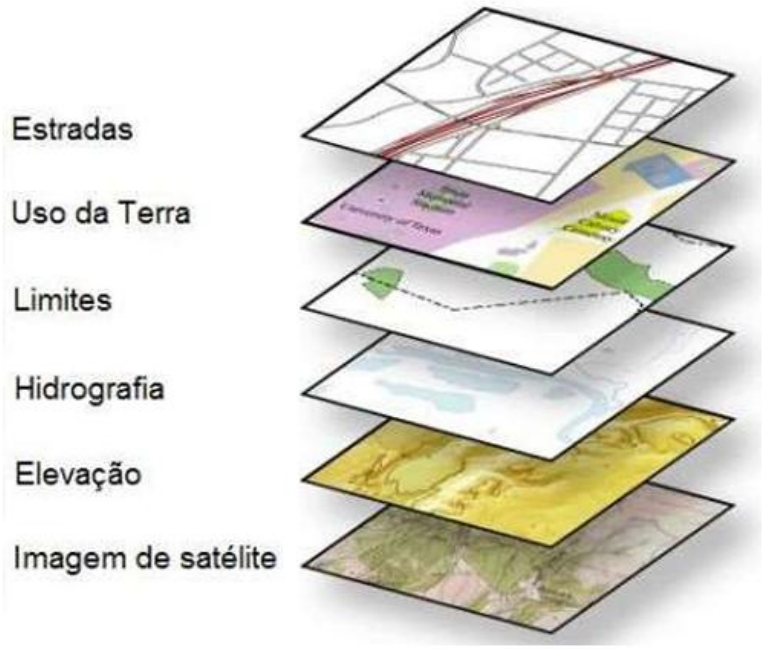
2.4 O geoprocessamento como ferramenta de análise do SDU

O uso de tecnologias geoespaciais, como os Sistemas de Informação Geográfica (SIG), tem se mostrado cada vez mais importante no planejamento urbano, especialmente no que diz respeito à avaliação da fragilidade dos sistemas de drenagem pluvial. Essas ferramentas

permitem integrar e analisar dados espaciais de diversas fontes, como mapas topográficos, imagens de satélite e fotografias aéreas, facilitando a visualização de padrões, relações e vulnerabilidades presentes nas áreas urbanas (ADASA, 2023).

Na Figura 4, podemos visualizar como se organiza são organizadas as camadas de um SIG.

Figura 4- Composição das camadas em um SIG



Fonte: Adaptado de ESRI (2009)

Felizardo (2016), explorou o SIG, para modelar o escoamento superficial em áreas urbanas. A pesquisa evidencia a relevância da análise espacial na identificação de áreas críticas quanto ao risco de inundação, considerando o impacto da urbanização na dinâmica hidrológica. Para isso, mapeou a localização da infraestrutura de drenagem, identificar o uso e a ocupação do solo, compreender a topografia local e, principalmente, analisar como esses elementos se relacionam com os volumes de escoamento e os riscos de inundação.

Esse tipo de análise contribui significativamente para a tomada de decisões mais assertivas, uma vez que permite direcionar intervenções para áreas que realmente necessitam de atenção, seja por apresentar histórico de alagamentos, declividades acentuadas ou deficiência estrutural nos sistemas de drenagem.

Outro ponto importante é que o SIG não atua apenas como uma ferramenta de mapeamento, mas também como um suporte analítico. Por meio da sobreposição de diferentes camadas de dados, é possível gerar mapas de fragilidade que destacam, por exemplo, áreas com alto índice

de impermeabilização combinadas com baixa capacidade de escoamento. Essas representações visuais, muitas vezes coloridas de forma intuitiva, facilitam a comunicação dos resultados com gestores públicos, técnicos e até com a população (Campos, 2019).

Diversos estudos demonstram como o uso de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) tem contribuído significativamente para o mapeamento e análise de áreas ambientalmente vulneráveis. Um exemplo é o trabalho de Sá (2016), que aplicou geotecnologias para o mapeamento da fragilidade ambiental no Perímetro Irrigado de São Gonçalo, no município de Sousa – PB. Utilizando o software Qgis, o autor analisou critérios como declividade, tipo de solo, uso e cobertura da terra, além de empregar um Modelo Digital de Elevação (MDE) aliado a técnicas de sensoriamento remoto. Essa abordagem permitiu a identificação de áreas mais suscetíveis à degradação ambiental, reforçando a importância das ferramentas geoespaciais no planejamento territorial e na gestão ambiental sustentável.

Essas tecnologias, quando combinadas, oferecem uma base sólida para entender a complexidade dos sistemas urbanos de drenagem. Elas não apenas permitem uma avaliação mais técnica e detalhada, mas também promovem a democratização da informação por meio de representações visuais acessíveis. Ao utilizar mapas, gráficos e dados georreferenciados, é possível planejar ações mais eficazes, evitar investimentos ineficientes e proteger a população, especialmente as mais vulneráveis.

2.5 Uso de sistema de levantamento a Laser Aerotransportado para criação de MDE e MDT

Nos últimos anos, os Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), conhecidos internacionalmente pela sigla UAV (Unmanned Aerial Vehicles), têm ganhado destaque como importantes aliados nas geotecnologias aplicadas ao meio urbano e ambiental. Esses equipamentos, mais conhecidos popularmente como drones, operam sem a presença de um piloto a bordo e são controlados remotamente. Essa característica garante mais segurança, rapidez e praticidade, principalmente na coleta de dados em áreas de difícil acesso. Dependendo do campo de estudo, esses veículos também podem ser chamados de Remotely Piloted Vehicles (RPV), Unmanned Vehicle Systems (UVS) ou, em português, Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARP) (Dantas, 2019).

O desenvolvimento de sensores embarcados cada vez mais precisos, como câmeras RGB, multiespectrais e sensores LIDAR, ampliou consideravelmente as possibilidades de uso dos VANTs. Hoje, eles são amplamente utilizados para o mapeamento de áreas urbanas, a

identificação de falhas em sistemas de drenagem e o monitoramento de processos erosivos. (Giongo; et al., 2010).

Como afirmam Silva et al. (2020), os VANTs permitem a geração de produtos como ortofotos, Modelos Digitais de Superfície (MDS) e Modelos Digitais de Terreno (MDT), todos com alta resolução espacial, o que torna possível uma leitura muito mais detalhada do relevo, da cobertura do solo e do comportamento do escoamento superficial.

Segundo Campanha et al. (2021), quando os dados obtidos por VANTs são integrados a Sistemas de Informação Geográfica (SIG), os resultados são ainda mais eficazes, contribuindo de forma direta para o planejamento urbano e para ações preventivas frente aos riscos hidrológicos e geotécnicos.

O sistema LiDAR (*Light Detection and Ranging*) é um sensor ativo que opera por meio da emissão de pulsos de laser a partir de uma plataforma aérea, terrestre ou orbital. Esses pulsos são emitidos em alta frequência e, ao atingirem alvos na superfície, retornam ao sensor, que registra o tempo decorrido entre a emissão e o retorno do sinal. Essa informação permite calcular com precisão a distância entre a plataforma emissora e os objetos na superfície (Giongo et al., 2010).

A fonte de energia do sistema LiDAR é própria, utilizando radiação eletromagnética em ondas curtas (entre 1 e 10 μm), o que o torna sensível a interferências atmosféricas, mas também eficaz em ambientes complexos. Justamente por não depender da luz solar, o LiDAR não sofre interferências de sombras causadas por nuvens ou objetos vizinhos, como acontece com sensores passivos (como câmeras fotográficas ou imagens de satélite). Essa característica amplia a sua aplicabilidade em diferentes condições de luminosidade e cobertura vegetal (Wagner et al., 2004).

Uma das principais vantagens do LiDAR é sua capacidade de penetrar através de pequenas aberturas no dossel da vegetação, permitindo a obtenção de dados precisos do relevo mesmo em áreas densamente arborizadas. Por esse motivo, a tecnologia tem sido amplamente utilizada na geração automática de Modelos Digitais de Terreno (MDT) de alta resolução e acurácia, sendo considerada uma ferramenta eficiente para mapeamentos em larga escala (Pacheco et al., 2011).

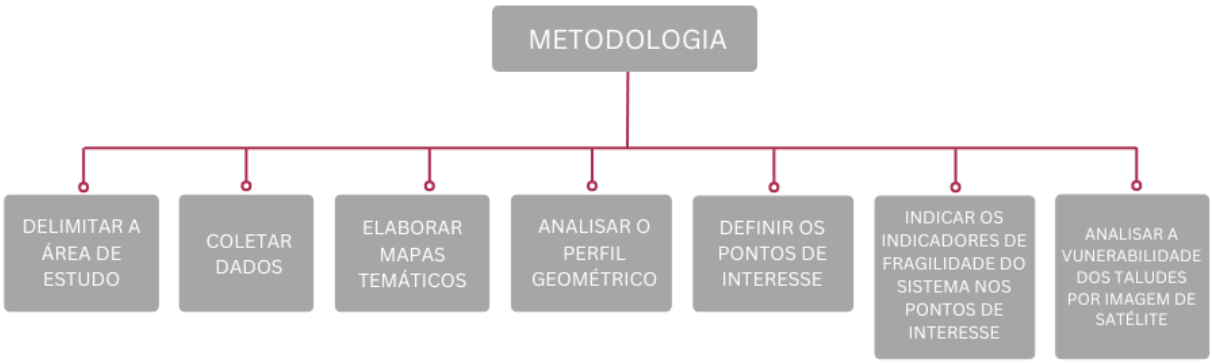
3 METODOLOGIA

3.1 Tipo de pesquisa

Esta pesquisa caracteriza-se como explicativa-exploratória, que considera o levantamento de campo com abordagem qualiquantitativa, permitindo analisar as condições atuais do sistema de drenagem pluvial na área estudada e aplicar indicadores de fragilidade nos pontos de interesse.

Além de se configurar como um estudo de caso, uma vez que a análise foi realizada na Avenida Pierre Chalita, na cidade de Maceió – AL, a pesquisa também adotou procedimentos bibliográficos, baseando-se em obras e literaturas que abordam as temáticas do trabalho. Para embasar a aplicação dos indicadores de fragilidade, foram considerados estudos prévios nos quais essa metodologia já foi utilizada. De forma visual, a metodologia aplicada segue o fluxograma representado na Figura 5.

Figura 5 – Fluxograma metodológico.



Fonte: Elaborado por autora, 2025.

3.2 Delimitação da área de estudo

O estudo de caso foi realizado na cidade de Maceió - AL, especificamente na Avenida Pierre Chalita. Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), no Censo de

2022, Maceió, capital de Alagoas, apresentava uma densidade demográfica de 1.880,77 habitantes por km² e uma população total de 957.916 habitantes.

A Avenida Pierre Chalita é uma via importante, que atravessa a região sul da cidade e conecta vários bairros (Figura 6), sendo uma alternativa viária de movimentação e relevância para o tráfego urbano da cidade de Maceió. A via é classificada quanto à função como, via arterial, possui duas faixas de rolamento em alguns trechos da sua extensão, com pavimentação asfáltica, sistema de meio-fio e sarjeta.

De acordo com informações disponibilizadas pela Prefeitura de Maceió, através do setor técnico de topografia da Secretaria Municipal de Meio Ambiente e Urbanismo - SEMURB, a Avenida tem início na alça localizada ao lado do Loteamento Bosque das Palmeiras, no bairro Serraria, estendendo-se até o início do Conjunto Alfredo Gaspar de Mendonça, no bairro Jacarecica.

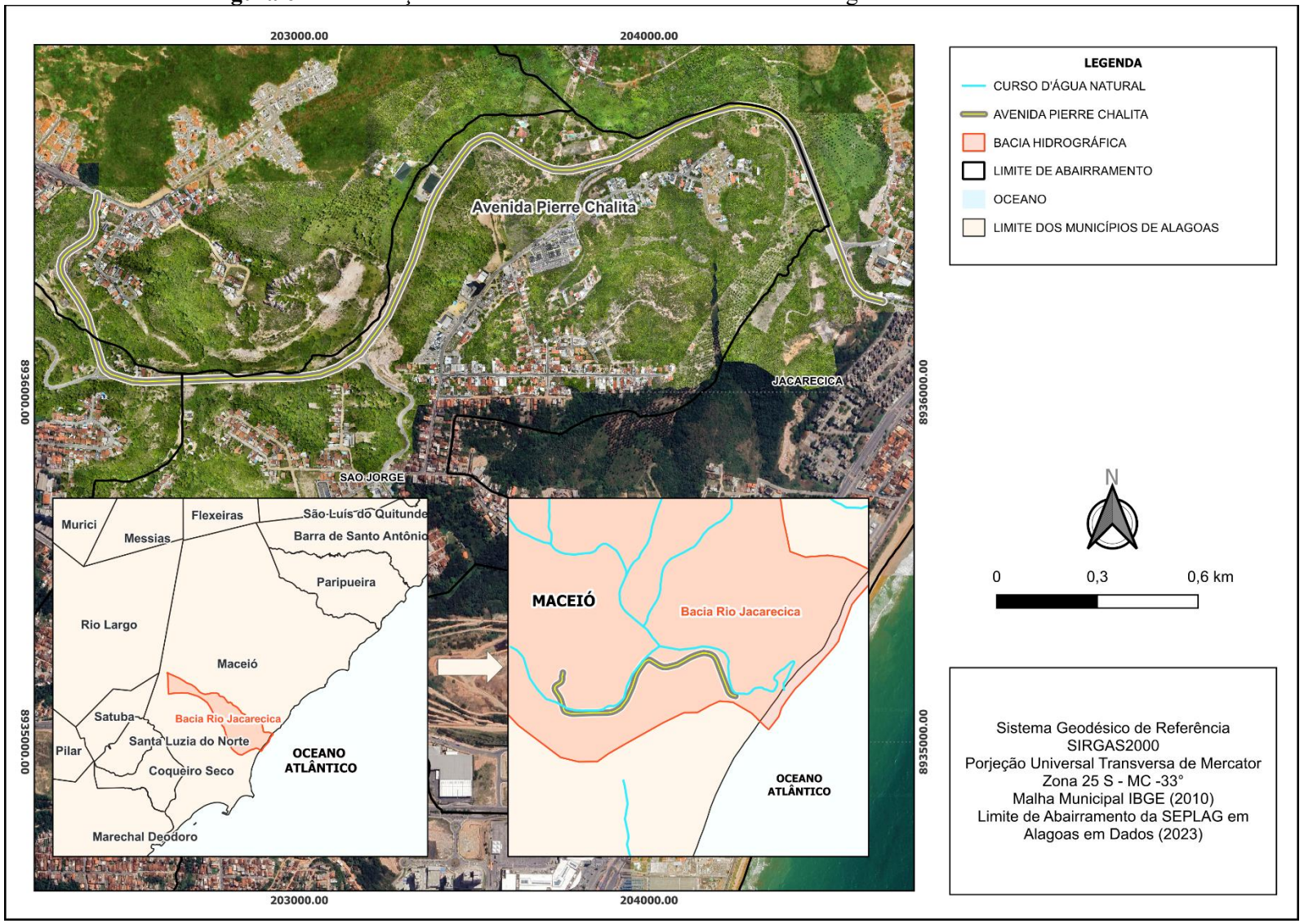
Dessa forma, a área de estudo abrange um trecho de aproximadamente 3,55 quilômetros de extensão. O trecho inicia-se sob coordenadas geográficas 9°36.583'S, 35°42.664'O, e se estende até as coordenadas 9°36.746'S, 35°41.474'O. As coordenadas foram obtidas por meio da plataforma *Google Earth Pro*.

Uma característica importante da via é que está situada dentro dos limites de uma microbacia hidrográfica, denominada Microbacia do Rio Jacarecica. O rio representa o curso d'água principal da microbacia, recebendo contribuições de diversos afluentes secundários e funcionando como o exultório natural, ou seja, o ponto de menor altitude para onde converge todo o escoamento superficial gerado dentro dos limites da bacia.

Dessa forma, as águas provenientes das áreas mais elevadas da microbacia fluem em direção ao leito do rio e aos seus afluentes, acompanhando o gradiente natural de declividade do terreno, o que, no caso específico deste estudo, inclui a região da Avenida Pierre Chalita, conforme visto na Figura 6.

Além que, a via está inserida em uma região com baixo grau de urbanização, o que demanda atenção especial frente ao avanço do processo de ocupação urbana, uma vez que a substituição das áreas permeáveis por superfícies impermeáveis pode comprometer significativamente a capacidade de infiltração do solo, aumentando o escoamento superficial e, consequentemente, a sobrecarga no sistema existente, afinal, o crescimento ordenado poderia trazer a reestruturação da área.

Figura 6 – Localização da área de estudo e o limite da bacia hidrográfica do Rio Jacarecica.



Fonte: Autor, 2025.

3.3 Coleta de dados para caracterização da área de estudo

A coleta de dados foi realizada de forma integrada, combinando informações primárias e secundárias. Como dado primário, utilizou-se uma imagem NASA DEM, um Modelo Digital de Elevação (MDE) obtido por radar orbital durante uma missão da NASA em 2020, com resolução espacial de 30 metros, esse modelo é amplamente empregado em estudos altimétricos e serviu como base para a elaboração de mapas temáticos e para a análise inicial do relevo da microbacia.

A fim de compreender a situação atual do relevo da área de estudo, considerando que a Avenida Pierre Chalita está inserida em uma pequena parte da microbacia, e que os dados do NASA DEM foram coletados há 5 anos, foi necessário realizar um levantamento topográfico secundário.

Deste modo, de forma secundária, a área de estudo foi mapeada por meio de levantamento aerotransportado com um drone Matrice 500, equipado com tecnologia LiDAR, permitindo a geração de um modelo digital do terreno (MDT) com alta precisão espacial. Nesta fase foram realizadas ainda, vistorias de campo as quais permitiram identificar e registrar, com coordenadas georreferenciadas, os Pontos de Interesse (PI) ao longo da via.

A tecnologia LiDAR permite a aquisição de dados altimétricos com alta densidade de pontos e precisão centimétrica, inclusive em áreas com cobertura vegetal densa, o que seria de difícil acesso com métodos tradicionais.

O voo foi planejado com faixas de sobreposição longitudinal e lateral adequadas, seguindo os parâmetros técnicos de segurança e qualidade exigidos para o mapeamento. Os dados obtidos foram processados em *software* especializado, resultando na geração de um Modelo Digital de Terreno (MDT) e um Modelo Digital de Superfície (MDS), além da geração de curvas de nível. Esses produtos permitiram uma análise mais refinada do relevo, das feições topográficas e da identificação de áreas com potencial risco de instabilidade ao longo dos taludes viários.

Paralelamente ao levantamento LiDAR, foi produzido um ortomosaico georreferenciado da área de estudo, a partir das imagens obtidas da Aeronave remotamente pilotada - RPA. Esse ortomosaico foi gerado por meio de técnicas de fotogrametria digital,

utilizando *software* específico para o processamento e correção geométrica das imagens, assegurando a eliminação de distorções causadas pela topografia e pela perspectiva da câmera.

O resultado é uma imagem de alta resolução espacial, com precisão métrica e fidelidade geográfica, que servirá como base cartográfica para a análise visual e a vetorização de elementos relevantes, como redes de drenagem, limites de taludes, edificações e áreas com sinais de movimentação de massa.

3.4 Elaboração e Análise de Mapas temáticos

O uso de geotecnologias para o mapeamento da fragilidade, conforme indicado por Sá (2016), permite a avaliação do relevo por meio de mapas, tornando-se uma ferramenta importante para refinar os dados necessários, como no caso desta pesquisa.

Para a elaboração dos mapas temáticos, foi utilizado o software Qgis 3.34.11, uma plataforma de código aberto amplamente empregada em análises espaciais e geoprocessamento. O *software* possui compatibilidade com dados raster e vetoriais, além de oferecer ferramentas robustas para análise topográfica, modelagem de terreno e visualização em 3D.

Nesta pesquisa foram elaborados como mapas temáticos o mapa hipsométrico, o mapa de declividade e o mapa geológico. Esses mapas são fundamentais para a análise dos indicadores de fragilidade do sistema, pois permitem identificar as características físicas do terreno que influenciam diretamente no escoamento superficial.

Para a elaboração dos mapas no ambiente Qgis, foi necessário estruturar um Sistema de Informações Geográficas (SIG), no qual foram inseridos os dados raster e os arquivos vetoriais que subsidiaram a construção cartográfica. Todos os mapas foram confeccionados no Sistema Geodésico de Referência SIRGAS 2000.

Além disso, para os mapas de declividade e hipsométrico, empregou-se os dados vetoriais disponibilizados na plataforma *on-line* gratuita “Alagoas em Dados”, como a delimitação da bacia hidrográfica, limite de abairramento, cursos d’água, etc, juntos ao dados gerados do LiDAR.

3.4.1 Mapa Hipsométrico

Para o entendimento inicial da situação da área de interesse, que está inserida na microbacia hidrográfica do rio Jacarecica, foi elaborado um mapa hipsométrico com a imagem do NASA DEM, abrangendo toda a microbacia, conseguir identificar a drenagem natural da região. Posterior, foi feito também um mapa hipsométrico apenas da área de estudos para auxiliar na visualização e análise dos dados, com o MDT gerado através do LiDar.

Para banco de dados que permitiu a elaboração dos mapas, foram utilizados os modelos digitais no formato *raster*. Esses insumos foram integrados no ambiente Qgis junto aos arquivos vetoriais citados anteriormente, constituindo um Sistema de Informações Geográficas (SIG).

A partir disto, foram geradas as curvas de nível com intervalo altimétrico a cada 10 metros definido no ambiente Qgis, utilizando a ferramenta 'Contorno' (*Contour*). Esse procedimento permitiu a conversão dos dados de altimetria em feições vetoriais, fundamentais para a representação precisa das variações do relevo.

Após inserir o arquivo *raster*, foi aplicado uma simbologia do tipo *pseudocolor* para representar a variação altimétrica com base em uma paleta contínua de cores, e classificação por intervalos regulares de altitude. Posteriormente, foi utilizado o módulo de layout de impressão do Qgis para composição final dos mapas, incluindo fonte, legenda, barra de escala e orientação norte.

3.4.2 Mapa de Declividade

Já para a elaboração do mapa de declividade, foram inseridos no Qgis o Modelo Digital de Terreno (MDT) gerado pelos dados LiDAR e a ferramenta utilizada foi o algoritmo “declividade”, localizado em Raster, *Terrain Analysis*, que calcula a inclinação do terreno em graus.

Os valores de declividade obtidos a partir do Modelo Digital de Terreno (MDT), gerado com base em dados LiDAR, foram classificados em cinco classes (Tabela 5), conforme a metodologia proposta pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA (2009).

Tabela 5 – Intervalos de Declividade com respectivas denominações das classes.

Classe	Intervalo de declividade (%)
Plano	0 – 3
Suavemente ondulado	>3 – 8
Ondulado	>8 – 20
Fortemente ondulado	>20 – 45
Montanhoso	>45

Fonte: EMBRAPA, 2009.

3.4.3 Mapa Geológico

Para a elaboração do mapa geológico da área de estudo, foram utilizados dados vetoriais do mapeamento geológico da Bacia de Alagoas, provenientes do Projeto Geologia e Potencial Mineral da Bacia Alagoas, disponibilizados pelo Serviço Geológico do Brasil – CPRM (2023), na escala 1:100.000, em formato shapefile.

Por se tratar de uma escala pequena, o nível de detalhamento geológico é limitado para análises locais. No entanto, a base foi considerada adequada para a contextualização geológica geral da área de estudo.

Os dados foram inseridos no ambiente Qgis e recortados para o perímetro da Avenida Pierre Chalita, delimitando apenas as formações geológicas presentes na área de interesse. Em seguida, foi aplicada simbologia temática às unidades litoestratigráficas, igual ao mostrado na carta da CPRM, de forma a representar visualmente as diferentes composições do substrato geológico.

O mapa foi integrado a outras camadas, como curvas de nível, limites urbanos e a geometria da via, contribuindo para a compreensão das relações entre o tipo de solo e a estabilidade dos taludes.

3.5 Análise do perfil geométrico da via

A análise do perfil geométrico da via facilita o entendimento da topografia ao longo da via, auxiliando na identificação dos pontos de concentração de águas e áreas que podem precisar de melhorias no sistema de drenagem.

Para isto, foi realizada uma análise do perfil geométrico da via, utilizando duas abordagens complementares: o uso da plataforma *Google Earth Pro* e da ferramenta "*Terrain Profile*", que permitem a extração de perfis longitudinais de elevação com base em dados altimétricos.

No *Google Earth Pro*, o procedimento consistiu em traçar um eixo sobre a via principal da área de estudo utilizando a ferramenta “caminho”, e em seguida aplicar a função “Mostrar perfil de elevação”, que gera um gráfico detalhado da variação de altitude ao longo do traçado.

No Qgis, foi utilizado o complemento “*Terrain Profile*”, funcionalidade semelhante à ferramenta disponível no *Google Earth Pro*, para traçar uma linha vetorial ao longo do eixo da via, representando o trajeto a ser analisado. O Modelo Digital de Elevação (MDE) e o traçado da via foram inseridos no complemento, resultando na geração automática do perfil de elevação correspondente.

3.6 Definição dos Pontos de Interesse (PI)

A partir do ortomosaico, dos registros de ocorrências e identificação visual no campo, foi possível identificar os Pontos de Interesse (PI) ao longo da extensão da via. Esses pontos correspondem cada possível falha ou anomalia observada em imagem/campo, durante a execução do levantamento.

Cada ponto registrado, foi indicado para a elaboração de um mapa temático, com o objetivo de exemplificar e espacializar os resultados, facilitando a análise e interpretação dos fatores de risco associados à drenagem e à estabilidade dos taludes viários, além de conter a coordenada georreferenciada, possibilitando a localização precisa na ortofoto.

3.7 Metodologia apoiada em Indicadores de Fragilidade do Sistema (IFS)

Para a análise dos dados foi utilizada a metodologia do Índice de Fragilidade do Sistema (IFS), desenvolvida durante a Elaboração do Componente Drenagem do Plano Municipal de Saneamento Ambiental do Município de Alagoinhas – BA por Bruno Jardim da Silva e outros (UFBA) (2004).

De acordo com a metodologia, a avaliação do sistema de drenagem inicia-se com a definição dos Fatores Intervenientes (Tabela 1) e dos Indicadores de Fragilidade do Sistema (IFS) (Tabela 2). Esses fatores podem ser classificados em ambientais, tecnológicos e institucionais, e cada um desempenha um papel importante na análise da vulnerabilidade e da eficiência do sistema de drenagem.

Inicialmente, foi realizada uma abordagem geral da área de estudo, seguida por uma análise individualizada em cada Ponto de Interesse (PI), nos locais onde foram identificadas ocorrências de mau funcionamento do sistema de drenagem.

Após a definição dos fatores gerais a serem avaliados, foi gerado uma tabela única explorando cada Ponto de Interesse (PI), analisando individualmente quanto à manifestação dos Indicadores de Fragilidade do Sistema (IFS).

Para uma análise integrada, utilizou-se uma planilha de avaliação para facilitar a visualização dos fatores intervenientes por meio da atribuição de pesos variando de 0 a 5 (Tabela 3). Os pesos foram definidos com base na adaptação metodológica proposta por Santos Júnior (2014), permitindo a obtenção do grau de fragilidade associado a cada ponto analisado.

Em seguida, determinou-se o Índice de Fragilidade Geral, expresso em graus de fragilidade que variam de muito baixo a muito forte, de acordo com a somatória dos valores atribuídos às manifestações dos indicadores em cada Ponto de Interesse (PI). Dessa forma, quanto maior a incidência e a intensidade dos indicadores, mais crítica será a condição do ponto analisado, conforme Tabela 4.

Esse sistema de pontuação permite a hierarquização dos principais problemas identificados, funcionando como uma ferramenta de apoio à tomada de decisão e atuando como uma bússola para orientar ações corretivas e preventivas voltadas à melhoria do sistema de drenagem e estabilidade dos taludes.

3.8 Análise da vulnerabilidade dos taludes por imagem de satélite

A análise da estabilidade dos taludes também foi complementada por meio da interpretação de imagens de satélite disponibilizadas pela plataforma *Google Earth Pro*, que oferecem visualizações históricas e em alta resolução.

As imagens foram analisadas antes e depois da implantação da Avenida, por meio da ferramenta “Imagens históricas” do *Google Earth Pro*, possibilitando uma avaliação temporal das transformações na paisagem e da expansão urbana nas imediações da Avenida Pierre Chalita.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Definição dos Pontos de Interesse

Inicialmente foi elaborado o mapa para identificação dos Pontos de Interesse (Pi's), conforme mostra a Figura 6 abaixo.

A identificação georreferenciada desses pontos, previamente definida no ambiente SIG, serviu como base para a organização e o posicionamento das fotografias no espaço cartográfico. Essa integração entre dados espaciais e registros visuais contribuiu para documentar as condições observadas em campo, associando-as a coordenadas específicas e facilitando a interpretação técnica dos problemas explorados.

Figura 6 – Mapa de identificação do Pontos de Interesse (PI)



Fonte: Autor, 2025.

4.2 Características identificadas na área de estudo

4.2.1 Mapas hipsométricos

Para análise e classificação das formas de relevo, o mapa hipsométrico da bacia hidrográfica do Rio Jacarecica (Figura 6), no qual a variação das cores representa diferentes altitudes, facilitando a interpretação das características do relevo da área de estudo.

O resultado permitiu a identificação do gradiente topográfico da microbacia do Rio Jacarecica, destacando as áreas mais elevadas e as de menor cota, que influenciam diretamente na direção do escoamento superficial e na dinâmica dos processos erosivos e instabilidades de taludes observados ao longo da Avenida Pierre Chalita.

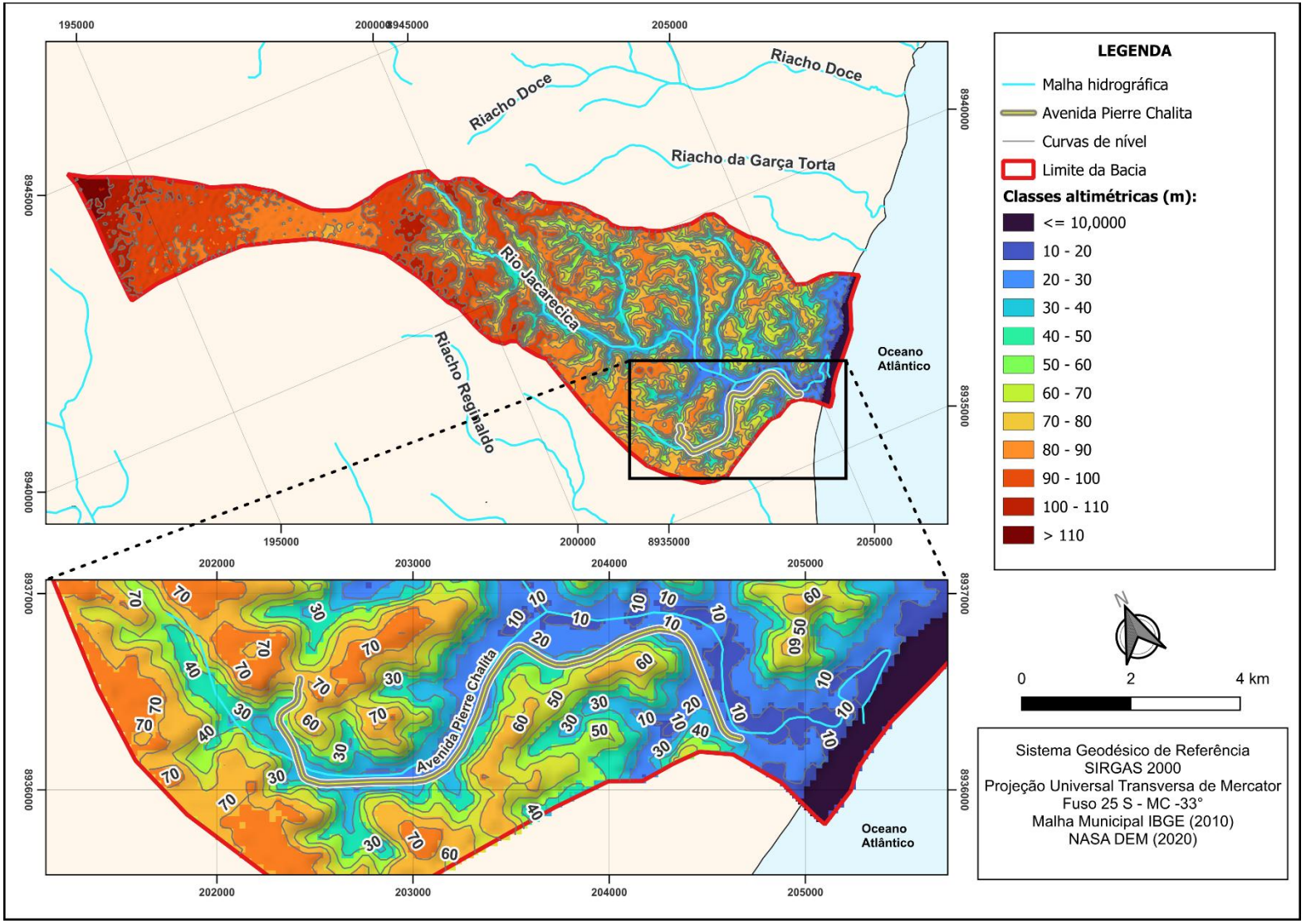
Uma via localizada em um ponto baixo de uma bacia hidrográfica, pode apresentar maior suscetibilidade à ocorrência de problemas relacionados ao escoamento das águas pluviais e à gestão da drenagem. Essa configuração ocorre na Avenida Pierre Chalita, como apresenta a Figura 7.

No que se refere a altitudes com variação de 10m, também é possível observar na Figura 9, a qual nota-se que diferenças entre os MDE foram mínimas, confirmando que o relevo da região permanece sem alterações significativas em relação aos aspectos morfológicos. As variações observadas concentram-se principalmente nos cortes geométricos realizados ao longo da Avenida Pierre Chalita, provavelmente decorrentes de intervenções urbanas associadas à implantação e manutenção da via.

Vale ressaltar que em áreas de baixa altitude, como observados nos mapas hipsométricos apresentados nas Figuras 7 e 9, o risco de alagamentos em função da ineficiência da drenagem, aumenta significativamente, especialmente durante chuvas intensas, já que a água tende a se acumular nesses locais, pois o fluxo natural se dirige para essas áreas mais baixas. Isso pode prejudicar o tráfego, colocando em risco a infraestrutura da avenida, além de afetar a segurança das pessoas que circulam pela região.

Além disso, áreas baixas em bacias hidrográficas frequentemente estão associadas a zonas de várzea ou planícies de inundação, onde o solo é mais suscetível à erosão. Em caso de chuvas fortes, a água pode não ser drenada de forma eficiente, resultando em sedimentos sendo transportados para a via, o que pode danificar o pavimento e reduzir a durabilidade da estrada.

Figura 7 – Mapa hipsométrico da bacia hidrográfica do Rio Jacarecica.



Fonte: Autor, 2025.

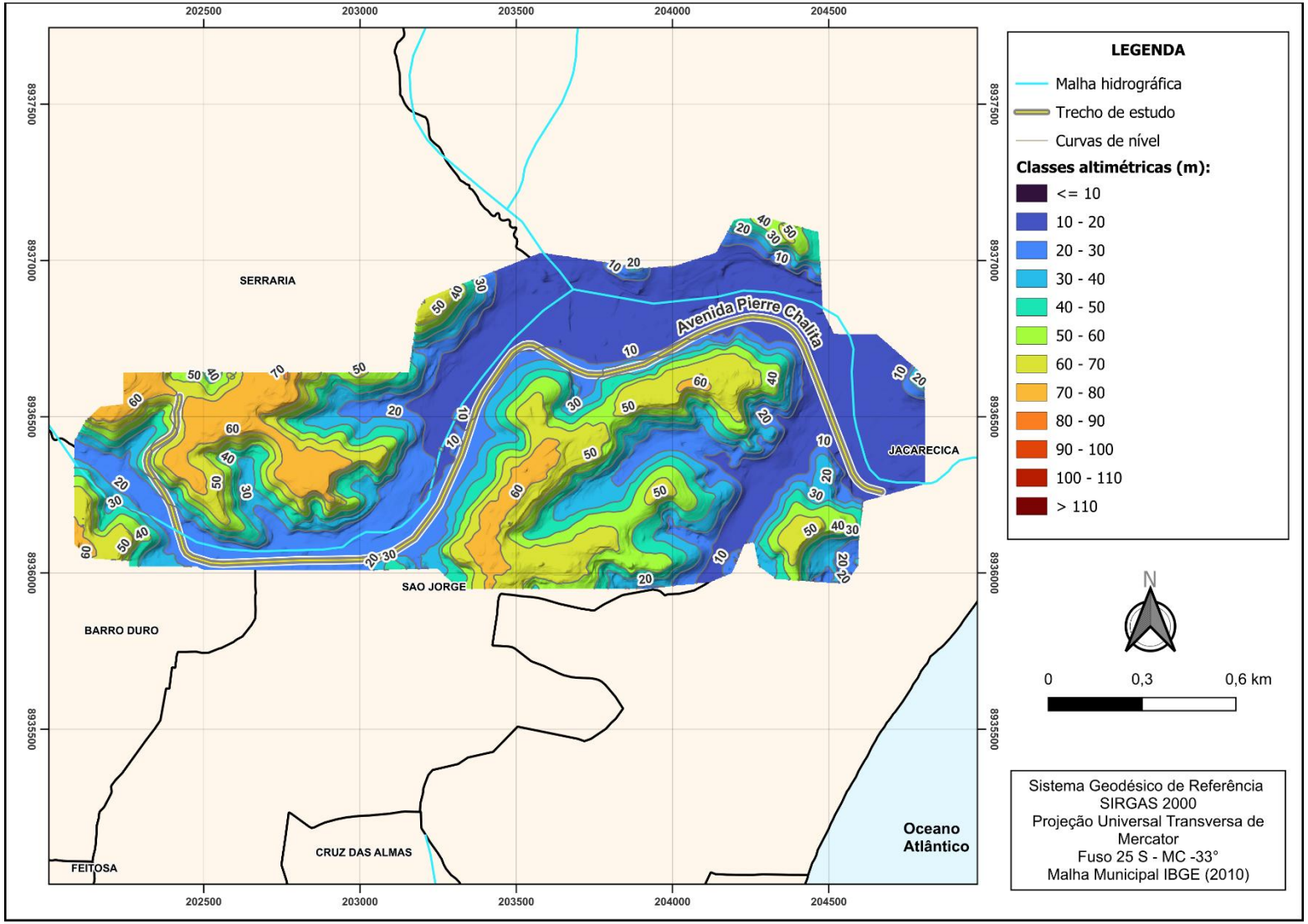
O risco de assoreamento também é maior, pois a água que desce pela bacia pode carrear resíduos e sedimentos que, ao se acumularem nas áreas baixas, obstruem o sistema de drenagem e pioram os problemas de alagamento. Em muitos casos, a construção de uma avenida em um ponto baixo pode agravar o problema de poluição hídrica, uma vez que resíduos da via, como óleo e lixo, podem ser facilmente transportados para o corpo d'água, conforme visto na Figura 8.

Figura 8 – Depósito irregular de lixo encontrado próximo ao Ponto 2.



Fonte: Autor, 2025.

Figura 9 – Mapa Hipsométrico da região da Avenida Pierre Chalita.



Fonte: Autor, 2025.

4.2.2 Mapa de Declividade

A Figura 10 apresenta o mapa de declividade da área de estudos com as classes categorizadas conforme EMBRAPA (2009), essas faixas foram representadas em gradientes de cor, facilitando a identificação visual dos setores mais críticos quanto à possibilidade de instabilidade e erosão.

Para facilitar a compreensão do mapa de declividade, a área analisada foi segmentada em trechos identificados pelas letras de A a E. Essa divisão permite uma leitura mais precisa dos pontos críticos e sua associação com registros visuais obtidos por meio do recurso *Street View* do *Google Maps*, com imagens datadas de agosto de 2024 (Figura 10).

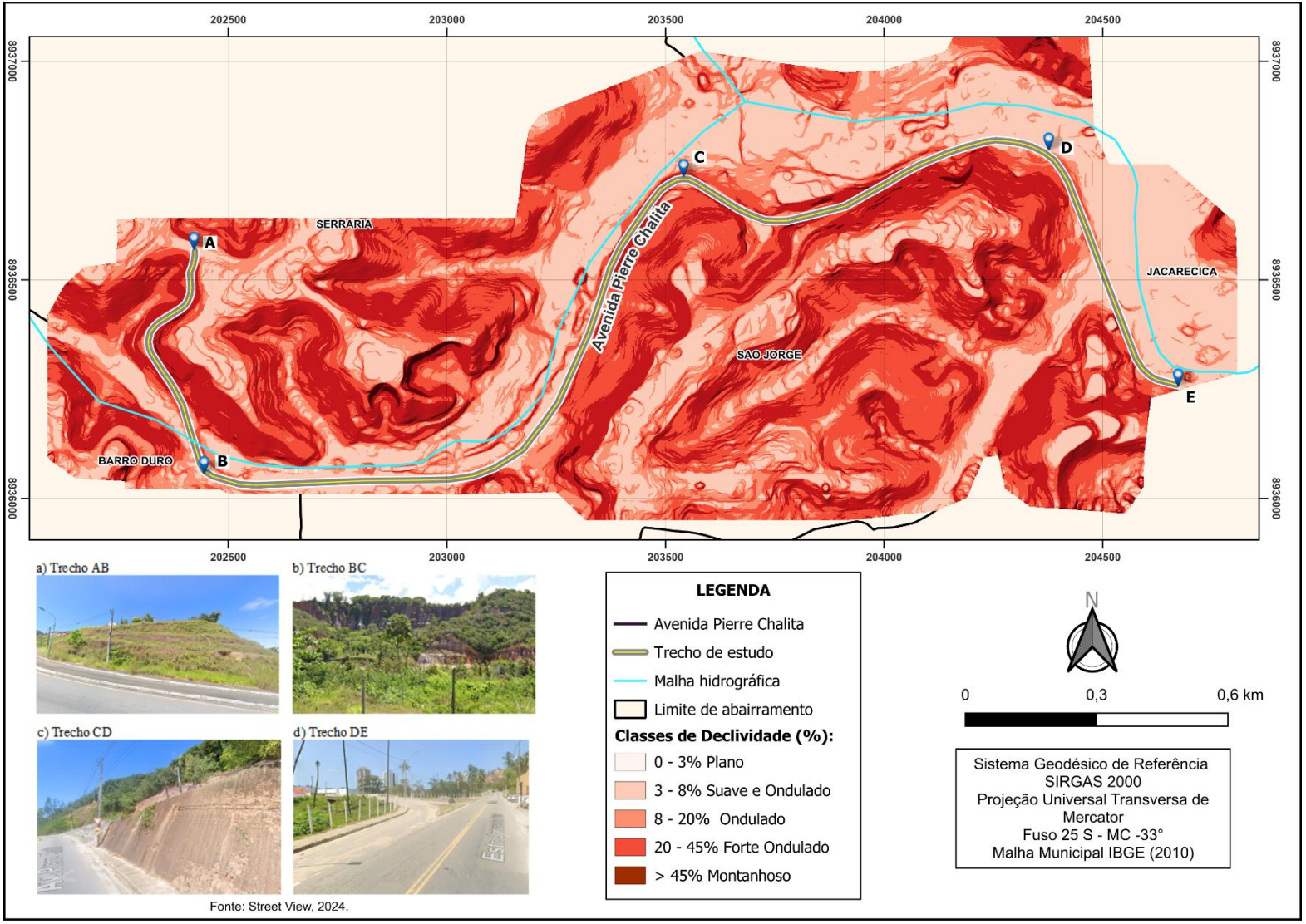
O trecho AC se destaca por concentrar áreas com características marcadas por formações montanhosas, e declividades superiores a 45%. Neste trecho, observa-se a presença de um talude (Figura 10-a), além de uma ruptura associada a processos erosivos (Figura 10-b), evidenciando a vulnerabilidade da encosta.

No trecho CD, há uma variação mais suave na topografia, com declividades predominantes entre 20% e 45%, e alguns pontos com declividades maiores. Este segmento compreende uma interseção viária onde foi implementado um talude de corte para contenção da via de acesso (Figura 10-c).

Por fim, o trecho DE situa-se próximo à ponte existente, apresentando declividades mais baixas, variando de plano a suavemente ondulado (Figura 10-d). Contudo, ao final desse trecho, observa-se um aumento acentuado na inclinação do terreno, atingindo novamente a classificação de declividade montanhosa.

De modo geral, quanto maior a declividade do terreno, maior é a vulnerabilidade dos taludes à erosão. Inclinações acentuadas favorecem o escoamento superficial da água, aumentando sua energia e capacidade de desprender e transportar partículas do solo, o que compromete a estabilidade das encostas.

Figura 10 – Mapa de declividade da região da Avenida Pierre Chalita.



Fonte: Autor, 2025.

4.2.3 Mapa Geológico

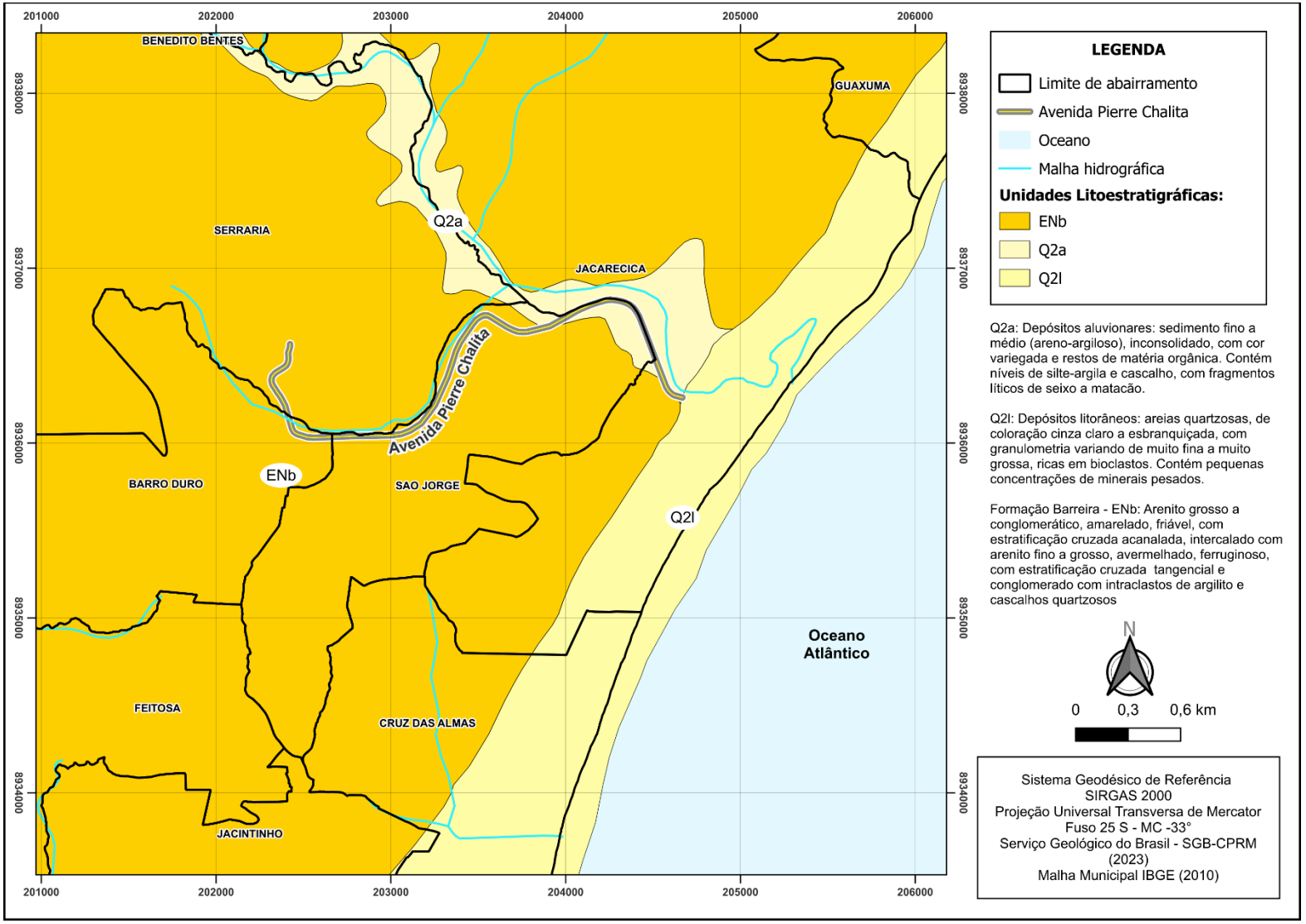
Quanto às características geológicas, a área de estudo da Avenida Pierre Chalita encontra-se predominantemente inserida nas unidades litoestratigráficas ENB (Quaternário) e Q2a (depósitos aluvionares), conforme ilustrado na Figura 11. A unidade ENB é definida como Formação Barreiras, depósitos lacistres e argilas orgânicas devem estar associados a litoestratigrafia Q2a vinculada a depósitos aluvionares. Tais materiais apresentam baixa resistência ao cisalhamento, o que os torna suscetíveis a recalques diferenciais e instabilidades geotécnicas, especialmente em áreas de cortes e taludes (Oliveira et al., 2012).

A unidade Q2a, representando os depósitos aluvionares, é composta por sedimentos de granulometria variada, predominantemente fino a médio (areno-argiloso), com coloração variegada e presença de matéria orgânica. Esses depósitos apresentam intercalações de níveis siltosos-argilosos e cascalhosos, contendo fragmentos líticos que variam de seixos a matacões, típicos de ambientes de deposição fluvial recentes. Embora esses materiais possuam maior permeabilidade em comparação com os lacustres, são altamente suscetíveis à saturação durante chuvas intensas, o que pode comprometer a estabilidade dos taludes e causar deslizamentos (Silva et al., 2004).

A presença desses materiais ao longo da via contribui para a instabilidade da infraestrutura viária, principalmente nas regiões onde ocorre o acúmulo de água e onde a drenagem é deficiente. De acordo com a literatura geotécnica, as unidades aluvionares e lacustres frequentemente apresentam desafios em áreas urbanas, especialmente em terrenos de baixa altitude ou em regiões de transição entre terrenos elevados e rebaixados, onde os taludes podem ser mais vulneráveis a falhas (Santos Júnior, 2014).

O conhecimento das características geológicas da área de estudo, permitiu compreender as propriedades do solo e identificar regiões de maior risco, devido a fatores como falhas geológicas ou solos instáveis.

Figura 11 – Mapa das unidades Litoestratigráficas da região de estudo



Fonte: Adaptado CPRM, 2025.

4.2.4 Visualização do perfil geométrico da via

A análise do perfil geométrico da via, realizada por meio do *Google Earth Pro*, possibilitou a identificação preliminar de trechos com declividades acentuadas, patamares, depressões e rampas, funcionando como uma etapa preliminar na avaliação da geometria da via (Figura 12).

Figura 12 – Perfil de elevação gerado pelo software Google Earth Pro.



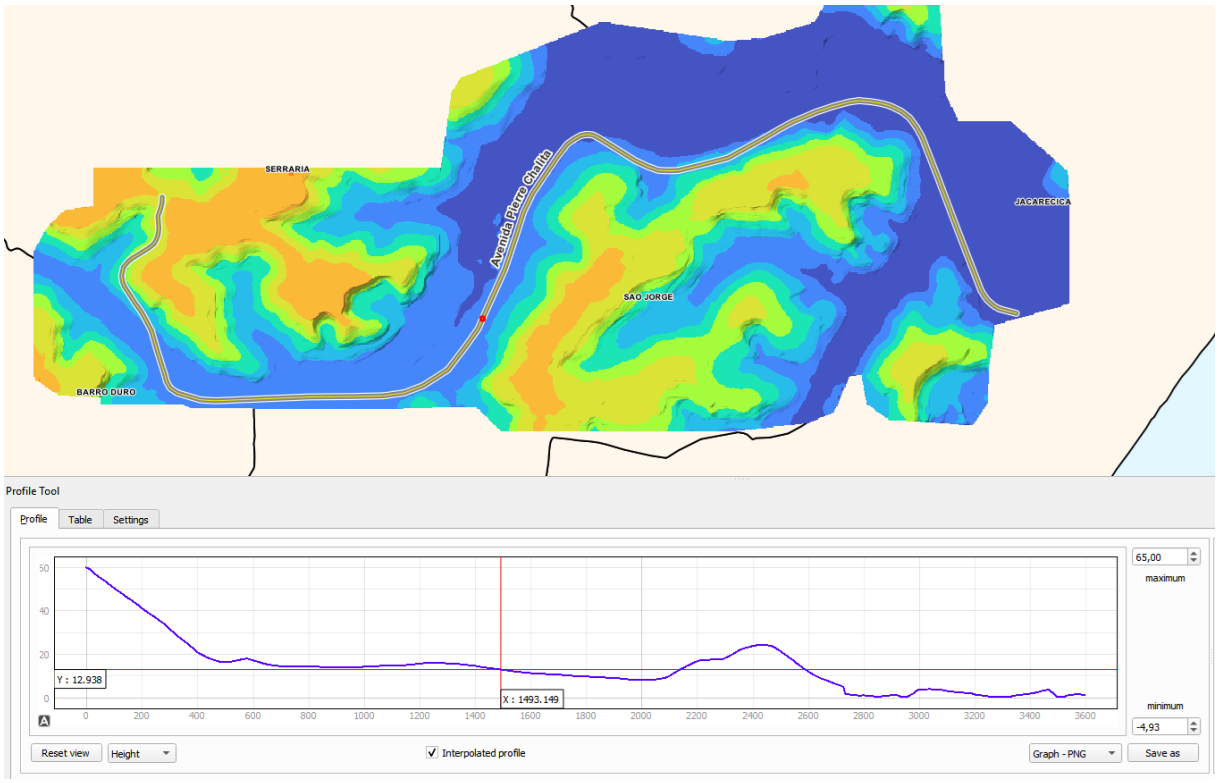
Fonte: Google Earth Pro, 2025.

De forma complementar à análise realizada no *Google Earth Pro* de forma preliminar, utilizou-se a ferramenta *Terrain Profile* no *software* Qgis, a qual gerou automaticamente um gráfico de elevação para uma análise detalhada, representando a variação altimétrica ao longo da via em função da distância, conforme apresentado na Figura 13.

Essa análise possibilitou visualizar de forma gráfica a variação da altitude ao longo do eixo da Avenida Pierre Chalita, evidenciando os trechos com maior inclinação, depressões, rampas e possíveis áreas críticas quanto ao escoamento superficial e à estabilidade de taludes.

As informações obtidas são importantes subsídios para comparar os dados gerados pelo levantamento planialtimétrico via drone LiDAR, com a variação altimétrica vista através do *Google Earth Pro,* visto que ele utiliza altitudes como base para representação do relevo o Modelo Digital de Elevação (MDE) oriundo da missão SRTM.

Figura 13 – Perfil de elevação gerado pela ferramenta "Terrain Profile".



Fonte: Autor, 2025.

Observa-se a partir de uma análise comparativa entre os dois perfis altimétricos, que os resultados apresentam semelhança significativa, validando a precisão dos dados altimétricos utilizados. Constatou-se que o alinhamento do eixo viário em ambas as análises apresenta alguns trechos com cotas altimétricas mais baixas, configurando-se como pontos potenciais de acumulação de água pluvial.

Esses locais demandam atenção especial no planejamento de intervenções para o sistema de drenagem, por representarem áreas críticas para o escoamento superficial e, consequentemente, para a estabilidade dos taludes adjacentes.

4.3 Diagnóstico dos Pontos de Interesse (PI's)

4.3.1 Ponto de Interesse 01

O ponto 1 está localizado em um trecho de curva acentuada da via, inserido em uma área com sinais de urbanização e presença de pequenas edificações. No entanto, a observação da região indica a existência de parcelamento irregular do solo, evidenciado pela distribuição

variada dos tamanhos das construções, o que as caracteriza como irregulares perante o planejamento urbano (Figura 14).

Essa condição contribui significativamente para o aumento da vulnerabilidade local, representando um risco potencial de ocorrência de processos erosivos, especialmente nas bordas da via, onde os taludes laterais podem sofrer degradação progressiva devido ao escoamento descontrolado das águas.

No mapa hipsométrico da Figura 9, observa-se que este ponto se encontra em uma cota baixa, entre 10 e 20 metros de altitude, o que favorece o acúmulo de águas pluviais provenientes das áreas mais elevadas.

Figura 14 – Indício de urbanização irregular próximo ao bordo da via e evidencia de cortes, indicadas por setas vermelhas.



Fonte: Autor, 2025.

Além disso, após observar o mapa hipsométrico da bacia (Figura 7), que o ponto analisado atua como uma área de recepção de águas provenientes de zonas urbanizadas situadas a montante, o que intensifica o volume de escoamento superficial. Somando-se a isso o lançamento irregular de efluentes hidrossanitários na rede pluvial, o que compromete ainda mais o desempenho do sistema e contribui para sua fragilidade estrutural, conforme evidenciado nas Figuras 15-b e 15-c.

Outro aspecto relevante refere-se à presença de um taludamento mal executado nas proximidades da rotatória. Devido à acentuada declividade do terreno, há acúmulo de material orgânico que é facilmente transportado para a sarjeta durante os eventos de chuva. Esse processo favorece a obstrução dos dispositivos de drenagem, como exemplificado na Figura 15-a, na qual se observa uma boca de lobo bloqueada por restos de gramínea, prejudicando o escoamento adequado das águas pluviais.

Figura 15 – Indicadores encontrados do início da via ao Ponto de Interesse 01.

a) BL obstruída com gramínea



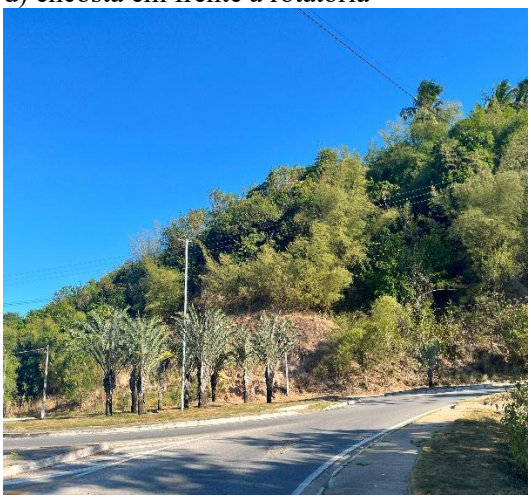
b) lançamento de efluentes em um PV



c) lançamento de efluentes em BL



d) encosta em frente a rotatória



Fonte: Autor, 2025.

4.3.2 Ponto de Interesse 02

O ponto 2 está inserido em uma área identificada como local que há registro de movimento de massa (Figura 16), apresentando sinais evidentes de retirada da vegetação nativa, o que favorece a instabilidade superficial em direção ao ponto mais baixo do sistema.

Figura 16 - Movimento de terra registrado



Fonte: G1 Globo, 2023.

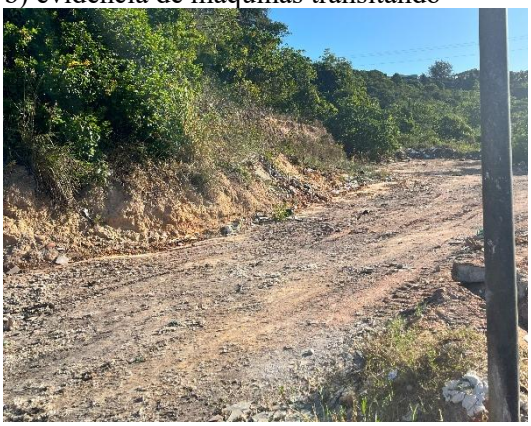
Localizado também entre as cotas de 10 e 20 metros, o ponto 02 funciona como uma zona de deposição de materiais transportados de áreas situadas a montante, como visto *in loco* (Figura 17).

Figura 17 – Indicadores encontrados entre os Pontos de Interesses 02 e 03.

a) depósito irregular de lixo



b) evidência de máquinas transitando



c) fissuras encontradas no talude



d) vegetação retirada



Fonte: Autor, 2025.

Como observa-se no ponto 1, esta área também se encontra em processo de urbanização, onde o avanço das ocupações ainda não está acompanhado da devida infraestrutura urbana. A zona residencial situada nas partes mais altas do terreno direciona os efluentes hidrossanitários diretamente para o curso d'água natural que corta a região. Essa prática irregular compromete a qualidade ambiental do corpo hídrico, além de transportar resíduos sólidos e sedimentos que obstruem os dispositivos de drenagem e agravam o processo de degradação da área (Figura 18).

Figura 18- Lançamentos de efluente identificado na ortofoto.



Fonte: Autor, 2025.

4.3.3 Ponto de Interesse 03

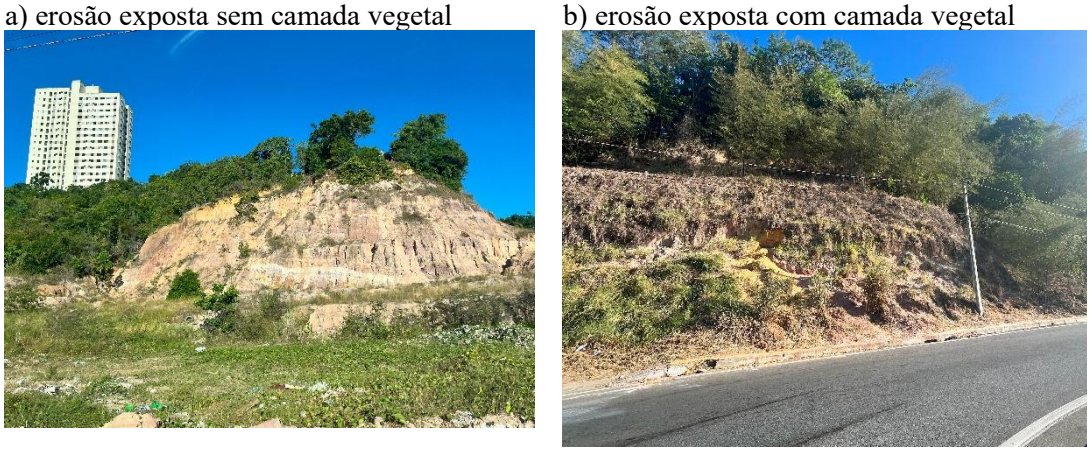
O ponto 3 destaca-se como uma das áreas mais críticas, devido à sua localização nas imediações de uma interseção viária, onde são evidentes indícios de desmatamento e grande exposição do solo, como visto na Figura 19 nos itens “a” e “b”. A suscetibilidade à movimento de massa é elevada, agravada pela ausência de dispositivos visíveis de contenção ou drenagem, o que aumenta o risco de processos erosivos e de comprometimento da estrutura do talude, os quais não foram encontrados em nenhum dos pontos de interesse analisados anteriormente.

O ponto 3, localizado próximo a uma interseção viária, apresenta características geomorfológicas de transição entre áreas de média e baixa altitude, com elevações variando entre 20 e 40 metros (Figura 9).

A localização estratégica do ponto, em conjunto com as características topográficas do terreno, contribui para sua acentuada vulnerabilidade frente à dinâmica hidrológica da região, conforme evidenciado nas imagens da Figura 19.

Figura 19 – Indicadores encontrados entre os Pontos de Interesses 03 e 04.

a) erosão exposta sem camada vegetal b) erosão exposta com camada vegetal



Fonte: Autor, 2025.

É importante destacar que, mesmo quando há cobertura vegetal atuando como elemento de proteção superficial do talude, a ausência de dispositivos adequados de drenagem pluvial torna a encosta suscetível a processos de deslizamento. No entanto, não foram observados indícios visíveis de quaisquer sistema de drenagem no local, durante a inspeção.

4.3.4 Ponto de Interesse 04

No ponto 4, apesar da aparente estabilidade dos taludes e do posicionamento em uma área elevada, foi constatada fragilidade no sistema através de rupturas no talude ao lado da via (Figura 20-b), o que pode acarretar, a médio prazo, danos estruturais e instabilidade do terreno devido à infiltração excessiva de água.

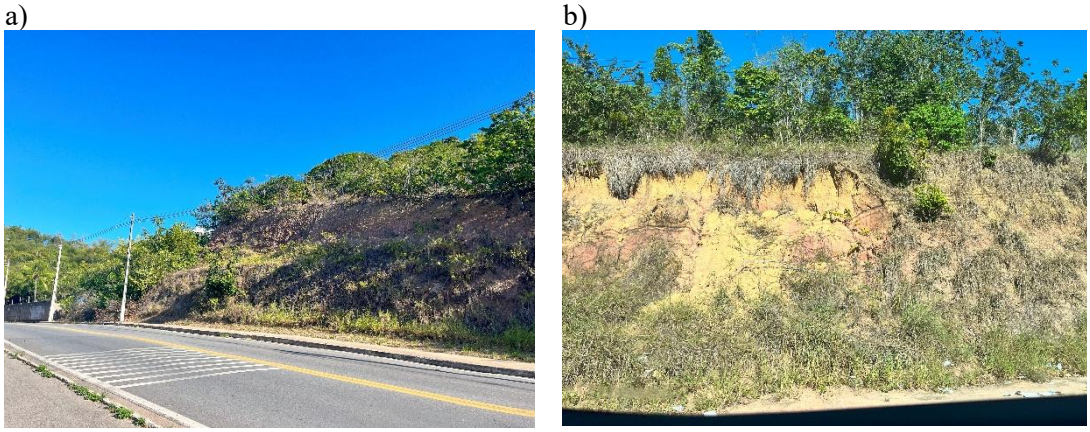
O ponto 4 está localizado em uma das áreas mais elevadas da Avenida Pierre Chalita, com altitudes superiores a 60 metros, conforme indicado pelo mapa hipsométrico (Figura 9). Essa característica corrobora para que área seja uma zona de escoamento superficial, contribuindo para o carregamento hídrico das zonas mais baixas.

Apesar de alguns trechos apresentarem encostas sem indícios de fragilidade (Figura 20-a), a ausência de controle adequado do fluxo pluvial e de cobertura vegetal pode resultar em erosão superficial e no transporte de sedimentos para áreas mais vulneráveis a jusante. Tendo em vista que a característica do solo já é associada a pré-disposição dos sedimentos mal consolidados.

Levando em conta que a urbanização tem se intensificado na região, faz-se necessário uma maior atenção no planejamento da drenagem urbana e na contenção dos taludes nesse trecho.

Figura 20 – Indicadores encontrados entre os Pontos de Interesses 04 e 05.

a) b)



Fonte: Autor, 2025.

4.3.5 Ponto de Interesse 05

O ponto 5 está situado em uma área de transição altimétrica, com variação entre 30 e 50 metros, apresentando características morfológicas que favorecem o direcionamento do escoamento superficial em direção à via (Figura 9). Esse escoamento é responsável pelo transporte de acúmulos de lixo, o que agrava a fragilidade do sistema de drenagem (Figura 23-c).

Entre os poucos dispositivos de drenagem encontrados, destaca-se uma boca de lobo, que estava obstruída devido à tampa quebrada e à falta de manutenção por parte da gestão municipal (Figura 21-a).

É possível observar que esse trecho carece de acessibilidade para pedestres, já que não possui passeio em uma parte considerável do trajeto, além da descontinuidade da ciclovia (Figura 21-d). Além disso, o serviço de gás está localizado no lado direito do espaço destinado aos pedestres, e a sinalização é insuficiente, sendo parcialmente coberta pela vegetação, o que obstrui as informações (Figura 21-b).

De modo geral, é um trecho onde não há evidências ou registros de movimentos de terra e alagamentos, indicando uma relativa estabilidade na área. No entanto, a presença de problemas como a obstrução dos dispositivos de drenagem e o acúmulo de lixo podem, com o tempo, contribuir para o agravamento da situação, caso não sejam tomadas as devidas providências de manutenção e melhoria da infraestrutura.

Figura 21 – Indicadores encontrados entre os Pontos de Interesses 05 e 06.

a) boca de lobo obstruída



b) serviço de gás no meio fio



c) acúmulo de lixo resultante da chuva



d) ausência de passeio do lado direito



Fonte: Autor, 2025.

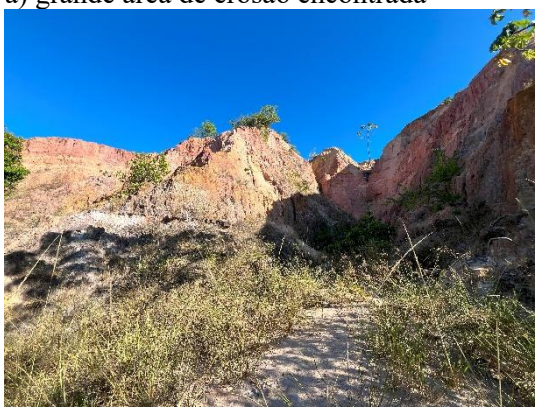
4.3.6 Ponto de Interesse 06

O maior aspecto visual identificado no Ponto 6, é uma grande cratera abertura no terreno devido a erosão não controlada no final da via, só foi possível identificar o quão grande ela é só chegando próximo, pois a vegetação rente a via acaba escondendo a erosão, como visto nos itens “a” e “c” da Figura 22.

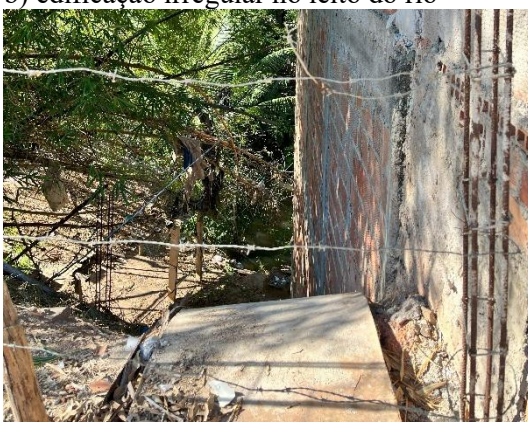
Além disso, foi observada a presença de edificações em expansão e intervenções irregulares no entorno, como canalizações improvisadas e a ausência de dispositivos de drenagem eficientes. Esses fatores aumentam a pressão sobre o sistema natural, intensificando os riscos de instabilidade e degradação ambiental local. Um exemplo claro disso é uma residência encontrada com frente voltada para a avenida e fundos voltados para o Rio Jacarecica, o que evidencia a proximidade de áreas suscetíveis à influência de fluxos hídricos (Figura 22-b).

Figura 22 – Indicadores encontrados entre o Ponto de Interesse 06 até o fim da via.

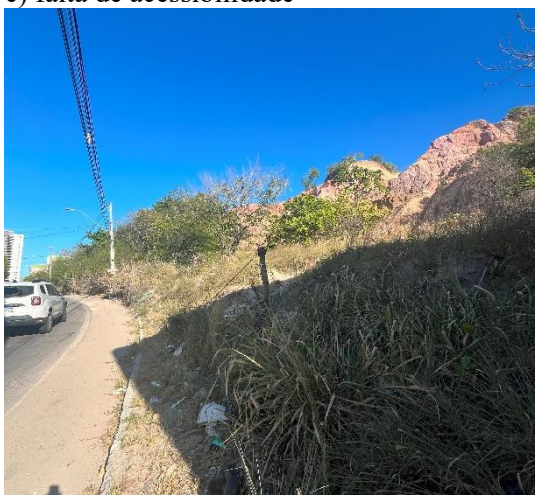
a) grande área de erosão encontrada



b) edificação irregular no leito do rio



c) falta de acessibilidade



d) via ao lado do rio



Fonte: Autor, 2025.

Por fim, o ponto 6 encontra-se próximo ao limite leste do trecho analisado, inserido em uma cota entre 20 e 30 metros, com áreas adjacentes em elevações que superam os 50 metros (Figura 9). Essa configuração topográfica contribui significativamente para o direcionamento do escoamento em direção ao Rio Jacarecica, tornando o trecho mais propenso a alagamentos, uma vez que a via se encontra ao lado do rio (Figura 22-d).

A proximidade do corpo hídrico, aliada à ausência de sistemas de drenagem adequados, potencializa o risco de acúmulo de águas pluviais, agravando a vulnerabilidade da área a eventos de inundação, como registrado pela Prefeitura de Maceió (Figura 23). Esse cenário reforça a necessidade urgente de intervenções no sistema de drenagem, visando mitigar os impactos negativos, como alagamentos e danos à infraestrutura local.

Figura 23 – Registro de alagamento (2021).



Fonte: https://maceio.al.gov.br/noticias/dmtt/smtt-orienta-vias-alternativas-a-avenida-pierre-chalita, 2021

4.4 Análise geral dos resultados

Com base nos dados obtidos por meio dos mapas temáticos (declividade, hipsometria, modelo digital do terreno) e das visitas de campo, foi realizado o diagnóstico dos Índices de Fragilidade do Sistema (IFS), em cada Ponto de Interesse (PI) identificado ao longo da Avenida Pierre Chalita (Tabela 6).

Para cada PI, os indicadores foram analisados em conjunto, conforme metodologia adaptada de Silva et al. (2004) e Santos Júnior (2013), utilizando uma planilha de avaliação com atribuição de pesos variando de 0 a 5, de acordo com a gravidade e a presença dos fatores intervenientes.

A pontuação total dos indicadores em cada PI permitiu calcular o Índice de Fragilidade Geral, o qual foi classificado em faixas de intensidade: Muito Baixo, Baixo, Médio, Alto e Muito Alto. Essa classificação orienta a hierarquização dos trechos mais críticos, direcionando as ações prioritárias de intervenção e mitigação de riscos.

Tabela 6 – Índices de Fragilidade no Sistema para os Pontos de Interesse (PI).

NATUREZA	INDICADORES	VALORES (PESOS)					
		PI-1	**PI-2**	**PI-3**	**PI-4**	**PI-5**	**PI-6**
Ambiental	Ocorrência de alagamentos	3	5	3	0	2	5
	Prejuízos materiais	2	5	5	3	3	5
	Risco de vidas humanas	2	5	4	2	2	5
	Interferência negativa na rede natural de drenagem	2	4	5	2	3	5
	Erosão nos terrenos da bacia	2	5	5	2	1	5
	Deposição de sedimentos em vias públicas	3	5	5	2	3	2
	Interação inadequada com esgotos	5	5	5	2	4	5
	Interação inadequada com lixo	5	5	3	1	5	4
	Elevação das vazões de cheias	0	3	0	0	5	5
	Limitação das áreas de inundação	0	5	3	0	4	5
	Interferência no trânsito de veículos	3	5	5	4	5	5
	Interferência na circulação de pedestres	0	2	3	2	5	5
	Contaminação do corpo receptor	5	5	5	2	4	5
	Contato da população com águas poluídas	5	5	5	2	4	5
	Assoreamento do corpo receptor	2	5	5	2	1	5
Índice de fragilidade – Ambiental		**39**	**69**	**61**	**26**	**51**	**71**
Tecnológico	Escoamento ineficiente nas vias	2	5	4	2	5	5
	Dispositivo de coleta ineficiente	5	0	0	0	5	0
	Transporte hidráulico ineficiente	5	0	0	0	5	0
	Encarecimento das soluções	5	5	5	5	5	5
	Redução da vida útil dos equipamentos de drenagem	5	5	5	5	5	5
	Redução da vida útil dos pavimentos	5	5	5	5	5	5
	Abatimento de terrenos por carreamento de solo para galerias	5	0	0	0	5	0
Índice de fragilidade – Tecnológico		**32**	**20**	**19**	**17**	**35**	**20**
Institucionais	Elevação de gastos com manutenção e conservação	5	5	5	5	5	5
	Encarecimento das soluções técnicas	5	5	5	5	5	5
	Perda de credibilidade da Administração Pública	3	5	5	3	3	5
Índice de fragilidade – Institucional		**13**	**15**	**15**	**13**	**13**	**15**
Índice Geral de Fragilidade		**84**	**104**	**95**	**56**	**99**	**106**

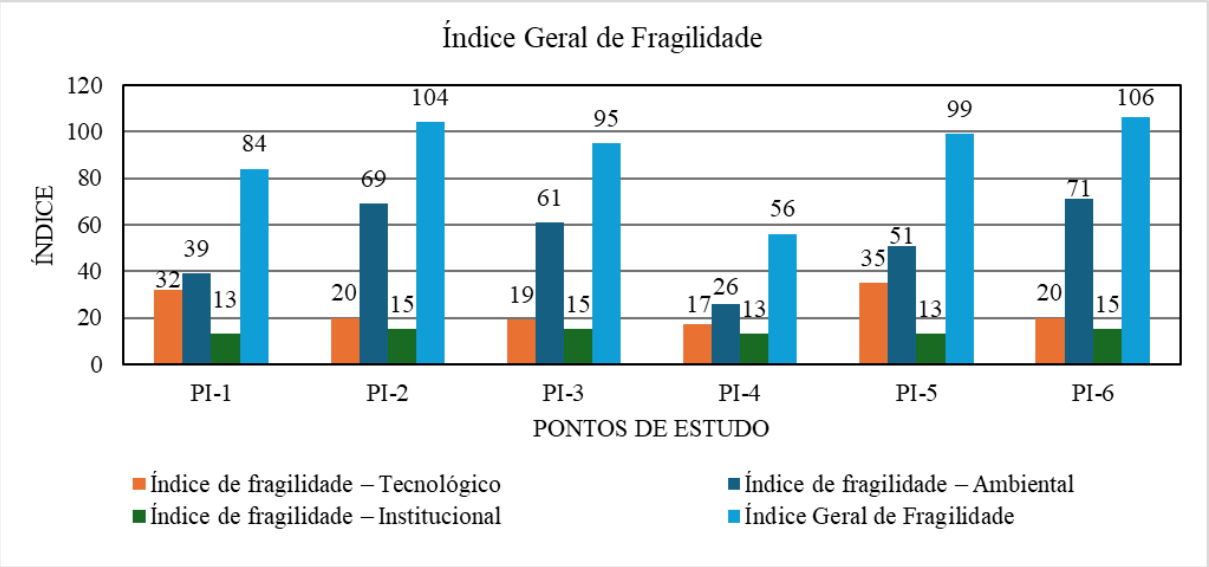
Fonte: Autor, 2025.

Dessa forma, foram obtidos os resultados do Índice Geral de Fragilidade (IGF), calculado a partir do somatório dos pesos atribuídos aos Indicadores de Fragilidade nas categorias Tecnológica, Ambiental e Institucional, previamente definidos conforme a metodologia adaptada de Silva et al. (2004) e Santos Júnior (2013). Cada Ponto de Interesse (PI) foi avaliado individualmente, considerando os fatores observados durante as visitas de campo e nos mapas temáticos.

O gráfico 1 apresenta de forma sintética os resultados do IGF, espacializando os diferentes graus de fragilidade ao longo da Avenida Pierre Chalita. Essa representação gráfica permite identificar de maneira clara os trechos com maior comprometimento estrutural e funcional, auxiliando na definição de prioridades para intervenção e readequação do sistema de drenagem pluvial e contenção de taludes.

Tais resultados indicam que esses locais devem ser priorizados para intervenções corretivas e preventivas, por apresentarem os riscos mais expressivos à eficiência do sistema de drenagem pluvial e à estabilidade geotécnica da via.

Gráfico 1 – Índice Geral de Fragilidade.

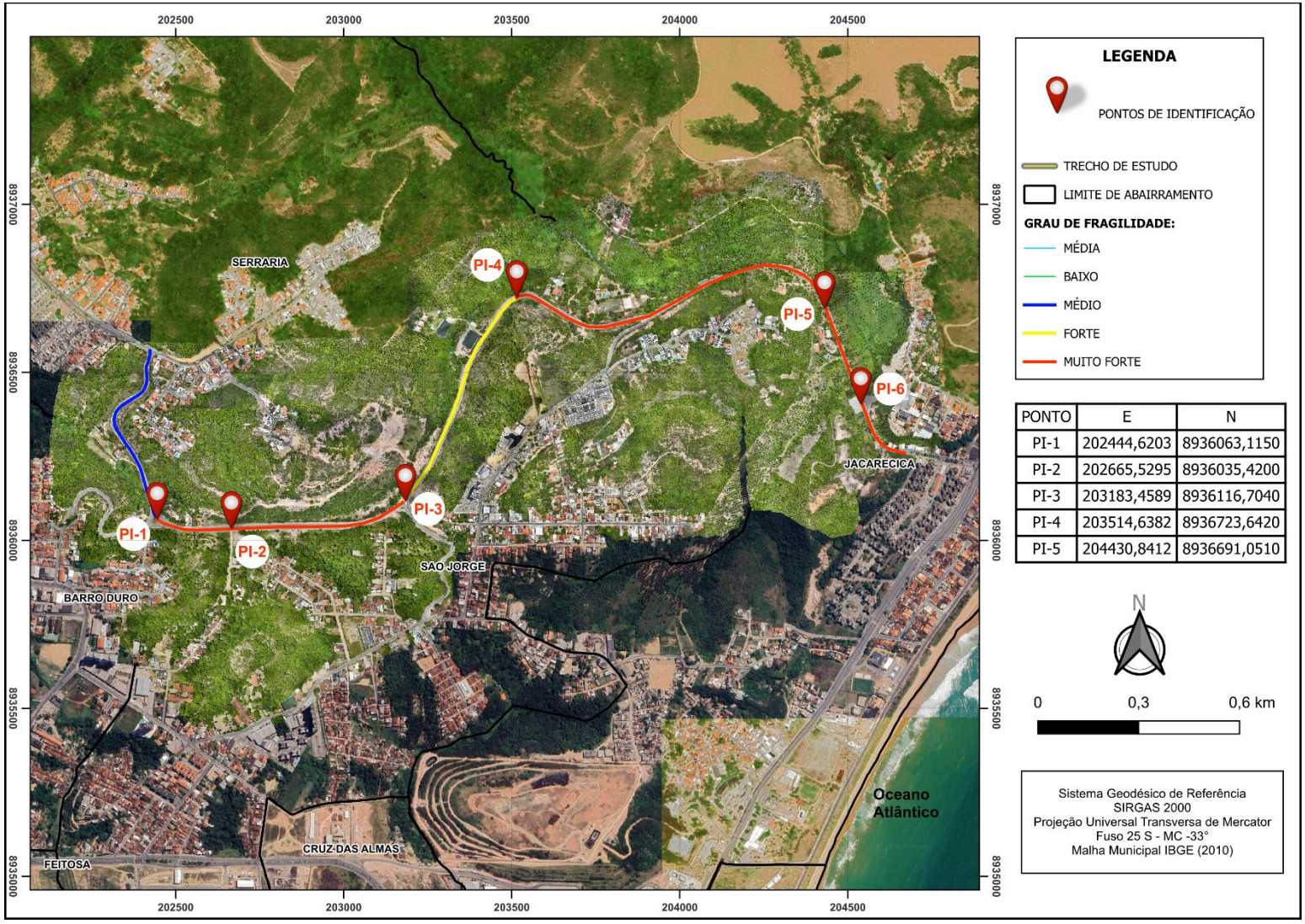


Fonte: Autor, 2025.

Por outro lado, os pontos PI-1, PI-3 e PI-4 apresentaram índices gerais mais baixos, com valores de 84, 95 e 56, respectivamente. Apesar de também demonstrarem algum grau de fragilidade, os valores mais reduzidos, sobretudo nos indicadores ambiental e institucional, indicam que esses trechos se encontram em condições relativamente melhores quando comparados aos três primeiros pontos.

Para uma melhor visualização dos resultados apresentados no Gráfico 1, foi elaborado um mapa temático (Figura 264), que utiliza a variação de cores para distinguir os diferentes trechos da via conforme o grau de fragilidade identificado nos sistemas analisados. Essa representação espacial facilita a compreensão da distribuição dos níveis de vulnerabilidade ao longo da via, permitindo a identificação visual imediata dos pontos críticos que demandam maior atenção em termos de intervenção e manutenção.

Figura 24 - Mapa da representação dos trechos com o grau de fragilidade geral.



Fonte: Autor, 2025.

A análise dos índices de fragilidade do sistema de drenagem pluvial urbana (IFS) e dos índices de Geral de Fragilidade (IGF) revelou padrões interessantes em relação à estabilidade dos taludes viários ao longo da Avenida Pierre Chalita. Foi observado que os pontos com os maiores índices de fragilidade coincidem com áreas que apresentam maior estabilidade dos taludes. Esse resultado sugere que, embora essas áreas tenham uma estabilidade estrutural aparente, o sistema de drenagem pluvial nessas regiões não esteja funcionando de forma eficiente, o que agrava a fragilidade do sistema de drenagem como um todo.

Com a análise espacial visto através do mapa de declividade na Figura 10, foi possível identificar alguns pontos no mapa com declividade montanhosa, com declividade acima de 45%, onde mostrou que os trechos da via com maior declividade coincidem com as Figuras 17, 19, 20 e 22, com áreas onde há maior manifestação de falhas no sistema de drenagem e sinais de instabilidade de taludes, o que reforça a importância dessa variável no diagnóstico da fragilidade do sistema viário da área de estudo.

Essa correlação pode ser explicada pela possível insuficiência do sistema de drenagem, que, mesmo em áreas estáveis do ponto de vista dos taludes, não é capaz de lidar adequadamente com o volume de água pluvial, especialmente em eventos de chuvas intensas. Consequentemente, ocorre o acúmulo de água nas vias e áreas adjacentes, o que pode levar à saturação do solo, desencadeando processos erosivos e, a longo prazo, comprometendo a estabilidade dos taludes.

Além disso, foi identificado que a falta de um planejamento integrado entre as estratégias de estabilização dos taludes e a melhoria da drenagem pode ser um fator determinante para a fragilidade do sistema. Em alguns pontos, mesmo a alta estabilidade do talude não foi suficiente para garantir a resistência a fenômenos como a erosão superficial e a infiltração da água, problemas que podem ser mitigados com a adequação e a manutenção do sistema de drenagem.

Este resultado indica a necessidade urgente de melhorias tanto na infraestrutura de drenagem quanto no planejamento urbano, para que as soluções implementadas considerem a relação entre drenagem e estabilidade dos taludes, evitando que um fator comprometa o outro.

4.5 Identificação visual das vulnerabilidades dos taludes

Com o apoio da ferramenta *Google Earth Pro*, foi possível localizar e identificar as feições de interesse e acompanhar as possíveis degradações ao longo dos anos. Assim, as imagens serviram como instrumento complementar no monitoramento preliminar da estabilidade dos taludes, agregando valor à análise integrada do sistema de drenagem e às condições geotécnicas da via.

A Avenida Pierre Chalita foi inaugurada em 2012. Contudo, não há registros em imagens de satélite disponíveis para esse ano na área de interesse, o que inviabiliza a verificação direta dos aspectos logo após sua implantação. Diante dessa limitação, adotou-se como referência a imagem mais próxima e posterior à inauguração, correspondente ao ano de 2013. Da mesma forma, como não há registros de 2011, utilizou-se uma imagem do ano de 2010 para representar as condições anteriores à obra, permitindo uma análise comparativa da evolução da ocupação e das alterações na paisagem.

Assim, ao analisar os Pontos 01, 02 e 03 antes da implantação da via (Figura 25), observa-se que o traçado geométrico da via seguiu, em grande parte, o caminho já existente das estradas de barro utilizadas anteriormente pela população local. Essa escolha possivelmente se deu por razões de economia e viabilidade técnica. Além disso, é possível identificar que a erosão entre os Pontos 02 e 03 já se manifestava desde o ano de 2010, anterior à pavimentação da via, o que evidencia uma fragilidade natural da área, provavelmente associada às suas características morfológicas e geológicas.

Figura 25 – Variação do relevo dos Pontos 01, 02 e 03, antes da implantação da via em 2010.



Fonte: Google Earth Pro, 2010.

Ao analisar a situação após a pavimentação da via (Figura 26), observa-se a realização de cortes significativos, especialmente nas proximidades do Ponto 03, onde há exposição evidente do solo.

Figura 26 – Variação do relevo dos Pontos 01, 02 e 03, depois da implantação da via em 2013.



Fonte: Google Earth Pro, 2013.

Um dos cortes mais marcantes encontra-se na interseção da alça de acesso ao bairro São Jorge, acesso que não existia anteriormente e que, até hoje, 12 anos após a sua execução, continua apresentando problemas estruturais não solucionados. Evidencia-se, ainda, que outro corte foi realizado nas imediações do Ponto 03, do lado oposto, onde já havia um processo erosivo não controlado, o que contribuiu para a intensificação da instabilidade local.

Além disso, analisando a Figura 26, foi possivelmente entender que essa área foi utilizada para empréstimo, pois os sedimentos de Formação Barreiras tendem a ter solos lateríticos também e que pode ser utilizado como base e sub-base.

Esse recurso permitiu a observação remota e contínua das condições superficiais da encosta ao longo do tempo, possibilitando a identificação de alterações na cobertura do solo, sinais de processos erosivos, surgimento de ravinas, cortes de vegetação e áreas com possível instabilidade.

Quanto em relação a variação do relevo dos Pontos 04, 05 e 06 antes da implantação da via, a implantação da via segue o mesmo raciocínio que os outros pontos, foi implantado em um trecho de estrada que já existia utilizada pela população. No entanto, parte da avenida já estava implantada, entre o Ponto 04 e 05, evidente na Figura 27, registrada em 2010.

Observa-se que, durante a implantação da via, não foram realizadas manutenções prévias nem ajustes no projeto de infraestrutura que considerassem as características naturais da área. Mesmo após anos, não há evidências de que esses aspectos tenham sido reavaliados com o objetivo de promover melhorias na via, como para o sistema de drenagem.

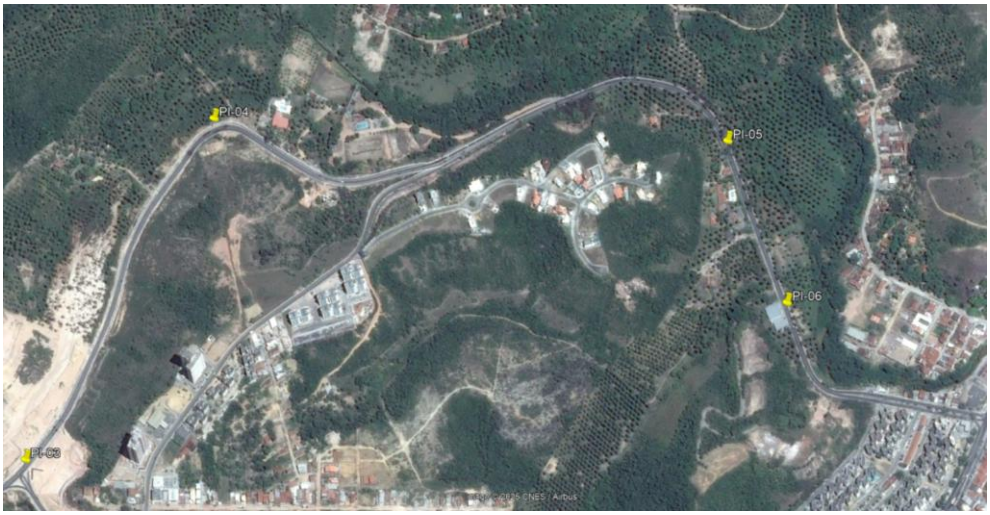
Figura 27 – Variação do relevo dos Pontos 04, 05 e 06, antes da implantação da via em 2010.



Fonte: Google Earth Pro, 2010.

Além disso, mesmo antes da implantação, o trecho já apresentava fragilidades importantes, como a proximidade com o rio e a presença de encostas que, evidentemente, demandavam dispositivos de drenagem eficientes para garantir a estabilidade do terreno e a durabilidade da via. O que não foi realizado, como visto na Figura 28.

Figura 28 – Variação do relevo dos Pontos 04, 05 e 06, depois da implantação da via em 2013.



Fonte: Google Earth Pro, 2013.

As fragilidades ainda persistem, como é possível visualizar na Figura 10, que parte significativa da região atravessada pela via apresenta declividades superiores a 45%, sendo classificadas como áreas montanhosas.

4.6 Propostas de solução

Com base na análise realizada e conforme as ações propostas na Tabela 7, são sugeridas melhorias técnicas e operacionais para o sistema de drenagem pluvial e para a estabilidade dos taludes da Avenida Pierre Chalita.

Tabela 7 – Ações recomendadas

ORDEM	AÇÃO	DESCRIÇÃO RESUMIDA	OBJETIVO
I	Drenos subterrâneos	Instalação de drenos em taludes para escoamento da água pluvial.	Reduzir a infiltração e prevenir deslizamentos.
II	Geotêxteis drenantes	Aplicação de geotêxteis que reforçam e drenam o solo.	Estabilizar taludes e evitar erosões.
III	Bocas de lobo e galerias	Construção/manutenção de estruturas de captação.	Evitar alagamentos e saturação do solo.
IV	Drenagem superficial	Instalação de canaletas e valas ao longo dos taludes.	Controlar o escoamento e evitar erosões.
V	Revegetação de taludes	Plantio de espécies com raízes profundas.	Melhorar infiltração e estabilidade do solo.
VI	Drenos de fundo	Drenos na base dos taludes para aliviar a pressão da água.	Reduzir umidade e risco de deslizamento.
VII	Muros de contenção drenantes	Construção de muros com drenagem embutida.	Conter os taludes e controlar a água pluvial.
VIII	Monitoramento técnico	Uso de sensores para controle da estabilidade.	Antecipar falhas e orientar manutenções.

Fonte: Autor, 2025.

Inicialmente, recomenda-se a implantação de sistemas de drenagem pluvial com drenos subterrâneos (Ação I), visando garantir a adequada captação e escoamento da água infiltrada nos taludes em todo os PI's, reduzindo a saturação do solo e prevenindo deslizamentos. Em complemento, propõe-se o reforço dos taludes com drenagem geotêxtil (Ação II), utilizando materiais geossintéticos que permitem a drenagem interna do solo e contribuem para a melhoria da estabilidade estrutural dos taludes inicialmente nos Pontos mais frágeis, 02, 03 e 06.

No âmbito da drenagem superficial, destaca-se a importância da construção e manutenção de bocas de lobo e galerias pluviais (Ação III), assegurando a rápida coleta e condução das águas pluviais, evitando o acúmulo de água nas vias e na base dos taludes, que podem serem realizadas no trecho do PI-01 e PI-05.

Adicionalmente, a implantação de drenagem superficial através de canaletas e valas drenantes (Ação IV) ao longo dos taludes em toda a via, permitirá controlar o escoamento superficial, reduzindo a velocidade da água e minimizando o risco de erosão.

Para reforçar a estabilidade dos solos, recomenda-se a revegetação dos taludes com plantas de raízes profundas (Ação V), medida que auxilia na contenção do solo, favorece a infiltração controlada da água e contribui para a proteção das encostas contra a erosão nos Pontos mais frágeis, 02, 03 e 06.

Complementarmente, propõe-se a implantação de drenos de fundo de taludes (Ação VI), dispositivos que captam a água na base das encostas, aliviando a pressão hídrica e prevenindo movimentos de massa nos pontos mais críticos como na ação V.

Em pontos críticos, pode-se fazer necessária a instalação de muros de contenção com drenagem embutida (Ação VII), que combinam reforço estrutural com controle eficiente da água pluvial, promovendo maior segurança aos taludes, como no trecho do PI-04. Por fim, para garantir a eficácia contínua das intervenções, é recomendada a implantação de um sistema de monitoramento da drenagem e estabilidade dos taludes (Ação VIII) para toda em via, utilizando instrumentos como inclinômetros, piezômetros e GNSS para detectar variações de comportamento e possibilitar ações preventivas.

Dessa forma, as ações listadas na Tabela 7 formam um conjunto integrado de soluções que, quando implementadas de maneira planejada e articulada, contribuirão significativamente para a melhoria do sistema de drenagem e para o aumento da segurança geotécnica da Avenida Pierre Chalita. Para melhor visualização das ações nos pontos, foi elaborada a Tabela 8, contendo um resumo das discursões.

Tabela 8 – Resumo das ações propostas por PI's

AÇÕES	PI 1	PI 2	PI 3	PI 4	PI 5	PI 6
I	X	X	X	X	X	X
II	-	X	X	-	-	X
III	X	-	-	-	X	-
IV	X	X	X	X	X	X
V	-	X	X	-	-	X
VI	-	X	X	-	-	X
VII	-	-	-	X	-	-
VIII	X	X	X	X	X	X

Fonte: Autor, 2025.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo analisou a fragilidade do sistema de drenagem pluvial urbana e suas implicações na estabilidade dos taludes viários na Avenida Pierre Chalita. A partir da investigação realizada, foi possível identificar que a deficiência dos dispositivos de captação e escoamento das águas pluviais contribui diretamente para a instabilização dos taludes e o comprometimento da infraestrutura viária.

A utilização das imagens LiDAR foi fundamental para a análise detalhada da morfologia da área de estudo, permitindo a identificação precisa de variações altimétricas, declividades acentuadas e possíveis áreas de instabilidade. A alta resolução dos dados possibilitou uma melhor compreensão da dinâmica superficial do terreno, contribuindo diretamente para o diagnóstico dos pontos críticos de drenagem e de risco geotécnico.

Observou-se que a sobrecarga hídrica, causada tanto pela limitação dos sistemas de micro e macro-drenagem quanto pela obstrução ou falta de manutenção dos dispositivos existentes, favorece processos erosivos e riscos de deslizamentos ao longo do percurso.

As análises confirmaram que grande parte da Avenida Pierre Chalita está situada em unidades litoestratigráficas do tipo ENB (Neógeno), compostas por solos mais propensos à instabilidade quando expostos a excessos de água. Assim, o estudo respondeu à questão de pesquisa ao evidenciar a relação direta entre falhas no sistema de drenagem e o aumento dos riscos geotécnicos nos taludes.

Os processos geodinâmicos predominantes na região envolvem principalmente movimentos de massa e processos erosivos superficiais, ambos comprometendo a estabilidade dos taludes ao longo da via. Os principais movimentos observados foram escorregamentos rasos, caracterizados pelo deslocamento de camadas pouco espessas de solo, muitas vezes associados a trincas no terreno, degraus de abatimento e inclinação de elementos arbóreos. Essas instabilidades estão relacionadas à baixa coesão dos solos da Formação Barreiras e às inclinações acentuadas em diversos trechos.

Os resultados apontam que as áreas mais vulneráveis estão justamente onde há declividades acentuadas, solos pouco coesivos e falta de vegetação densa. Nessas regiões, a ação da chuva intensifica a erosão e o risco de movimentos superficiais de massa, como escorregamentos rasos.

A vulnerabilidade indica que são necessárias ações corretivas e preventivas, como reforço na drenagem superficial e subterrânea, replantio de vegetação nativa e instalação de estruturas

de contenção em pontos críticos, visando garantir a estabilidade dos taludes e proteger a infraestrutura viária.

A presença de trincas, cicatrizes de deslizamentos e a deficiência de obras de contenção e drenagem evidenciam a fragilidade dos taludes e reforçam a necessidade de intervenções. A ocupação irregular próxima às encostas e a impermeabilização do solo também agravaram a vulnerabilidade, aumentando o volume e a velocidade do escoamento superficial.

Para mitigar esses efeitos, recomenda-se implementar dispositivos de drenagem, como sarjetas, canaletas e valetas, que conduzam a água de forma controlada, ajudando a evitar erosões. A manutenção regular da vegetação e dos sistemas de drenagem é fundamental para manter sua eficiência.

Este estudo apoia o planejamento urbano e a segurança pública ao identificar vulnerabilidades específicas na rede de drenagem e pontos críticos de instabilidade, fornecendo subsídios técnicos para a formulação de políticas e projetos de intervenção.

As ações propostas, incluindo obras de micro e macro-drenagem, recuperação de dispositivos danificados, instalação de drenos profundos, revegetação dos taludes e manutenção contínua dos sistemas, podem ser integradas aos planos de gestão da infraestrutura urbana. Assim, contribui para reduzir riscos geotécnicos, preservando o patrimônio público, garantindo a segurança dos usuários e promovendo um desenvolvimento mais sustentável e resiliente na Avenida Pierre Chalita e regiões próximas.

Durante a realização do estudo, algumas limitações foram identificadas, como o acesso restrito a áreas afetadas por processos erosivos e a falta de registros detalhados sobre a manutenção dos sistemas de drenagem.

Por se tratar de uma área extensa, a manipulação dos dados gerados por meio do LiDAR apresentou dificuldades, sobretudo devido ao elevado volume de informações. A alta densidade da malha de pontos resultou em arquivos pesados, o que comprometeu o desempenho e a fluidez no ambiente de Sistemas de Informação Geográfica (SIG).

Além disso, a ausência de um cadastro atualizado da rede de drenagem pluvial, aliada aos recapeamentos realizados ao longo dos anos, dificultou uma avaliação precisa da evolução dos problemas, prejudicando análises mais profundas sobre a efetividade das intervenções ao longo do tempo.

Para futuros estudos, recomenda-se implementar monitoramento contínuo das condições dos taludes, utilizando instrumentos como inclinômetros, piezômetros e receptores GNSS de alta precisão. O uso do GNSS permite acompanhar deslocamentos em escala milimétrica, fornecendo dados essenciais para antecipar instabilidades.

Também é importante realizar simulações hidrológicas considerando cenários de precipitação extrema, especialmente frente às projeções de aumento desses eventos decorrentes das mudanças climáticas, apoiando o planejamento de ações preventivas mais eficazes.

Além disso, estudos que integrem ações de gestão do uso do solo com a drenagem pluvial podem contribuir para estratégias mais abrangentes de prevenção de riscos em áreas urbanas vulneráveis.

REFERÊNCIAS

ADASA – AGÊNCIA REGULADORA DE ÁGUAS, ENERGIA E SANEAMENTO BÁSICO DO DISTRITO FEDERAL. ***Manual de drenagem e manejo de águas pluviais urbanas do Distrito Federal*.** Brasília: ADASA, 2023. Disponível em: https://www.adasa.df.gov.br/images/storage/area_de_atuacao/drenagem_urbana/regula%C3%A7%C3%A3o/Manual_de_drenagem_e_manejo_de_aguas_urbanas/Manual%20Drenagem%20Adasa_Digital_rev_compactado-2_compressed.pdf

ALCANTARA, K.C.; BRITO, M.F.L.; SILVA, C.R.M.; MORAIS, D.M.F.; PEREIRA, C.S. **Carta geológica da Folha Maceió (SC.25-V-C-IV): Estado de Alagoas.** Recife: Serviço Geológico do Brasil, 2023. 1 mapa color, 101 x 71 cm. Escala 1:100.000. Programa Geologia, Mineração e Transformação Mineral. Ação: Levantamentos Geológicos e Integração Geológica Regional.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10520**: informação e documentação: citações em documentos: apresentação. Rio de Janeiro, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14724**: informação e documentação: trabalhos acadêmicos: apresentação. Rio de Janeiro, 2011.

AUGUSTO FILHO, O. Caracterização Geológico-geotécnica Voltada à Estabilização de Encostas: uma proposta metodológica. **Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas**, Rio de Janeiro, RJ, 721 – 733 p. (1992)

BAPTISTA, M. B. Gestão das águas pluviais urbanas: desafios e oportunidades. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 9, n. 1, p. 5–16, 2004.

BASTOS, L. S. et al. Estudo da estabilidade de taludes em rodovias brasileiras. **Revista de Engenharia Civil**, v. 52, n. 1, p. 45–58, 2010.

BAUM, C. A.; GOLDENFUM, J.A. ***Indicadores e índices para o gerenciamento de águas pluviais urbanas no Brasil: situação atual e oportunidades de evolução***. Revista de Gestão de Água da América Latina, Porto Alegre, v. 18, n. 1, p. 1–18, 2021. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/356316612. Acesso em: 5 abril 2025.

BELLÉ, J. P. Avaliação da eficiência do sistema de drenagem urbana estudo de caso: Ijuí-RS. 2011. 112f. Trabalho de conclusão de curso (Monografia) - **Curso Engenharia Civil. Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul**. Ijuír, RS, 2011.
BRITO, W. D. L. Avaliação do sistema de drenagem urbana utilizando os indicadores de fragilidade: estudo de caso na estrada do Pimenta no bairro do Alto do Calhau em São Luís-MA. São Luís: **Centro Universitário UNDB**, 2020.

CAMPANHA, M. A.; FREITAS, D. R.; PEREIRA, J. C. (2021). **Diagnóstico de sistemas de drenagem pluvial por meio de geotecnologias e aeronaves remotamente pilotadas.** Revista Ambiente Construído, v. 21, n. 3, p. 115-129.

CAMPOS, W. S. **Sistema de informações geográficas (SIG) aplicado à análise de eventos de inundação e manutenção dos canais: um estudo de caso para a cidade de Belém**. 2019.

82 f.: il. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – **Universidade Federal Rural da Amazônia**, Curso de Engenharia Ambiental e Energias Renováveis, Belém, 2019.

CETTNER, A. et al. Sustainable urban drainage systems: systems thinking in practice. **Urban Water Journal,** v. 10, n. 5, p. 293–307, 2012.

COELHO, A. M.; FERNANDES, C. J. Técnicas de contenção de encostas e taludes em obras viárias. São Paulo: **Oficina de Textos**, 2015.

DANTAS, A. A. A. (2019). **Sistemas de aeronaves remotamente pilotadas: conceitos e aplicações**. Revista Brasileira de Cartografia, v. 71(4), p. 1-18.

DANTAS, J. B.; MARQUES, R. F.; TAVARES, I. T. M. **ESTUDO DOS DESLIZAMENTOS DE TERRA OCORRIDOS AO LONGO DA AVENIDA PIERRE CHALITA, MACEIÓ-AL**. In: Semana Oficial da Engenharia e da Agronomia- SOEA, 2022, Goiânia. **CONTECC** 2022, 2022.

ESRI. ArcGIS Desktop Help 9.1 (Web help). 2009.

FEITOSA, C. L. Avaliação do índice de fragilidade do sistema de drenagem pluvial urbano: estudo de caso Centro de Mossoró. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – **Universidade Federal Rural do Semi-Árido**, Mossoró, 2017.

FELIZARDO, L. M. *Aplicação de Sistema de Informações Geográficas (SIG) para modelagem de eventos críticos de vazão em uma microbacia urbana*. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual Paulista, [cidade], 2016. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/items/a9aac203-7085-4922-86b0-2eb92ff51b3d. Acesso em: 5 abril 2025.

G1 ALAGOAS. **Após deslizamento, Avenida Pierre Chalita passa por obras emergenciais em Maceió**. Maceió, 30 nov. 2022. Disponível em: https://g1.globo.com/al/alagoas/noticia/2022/11/30/pierre-chalita-obras.ghtml. Acesso em: 5 abr. 2025.

GERSCOVICH, D. M. S. Estabilidade de Taludes. Departamento de Estruturas e Fundações, **Universidade Federal do Rio de Janeiro**, RJ, 166 p. 2009.

GIONGO, M. et al. **LiDAR: princípios e aplicações florestais**. Pesquisa Florestal Brasileira. Colombo, 2010.

GUERRA, A. J. T. et al. *Processos erosivos e recuperação de áreas degradadas*. 2. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2012.

HIGLAND, L. M.; BOBROWSKY, P. The landslide handbook – A guide to understanding landslides. U.S. Geological Survey (USGS). Reston, Virginia, p. 129p. 2008. (Circular 1325).

IPCC. Sixth Assessment Report: Impacts, Adaptation and Vulnerability. **Intergovernmental Panel on Climate Change**, 2022. Disponível em: https://www.ipcc.ch. Acesso em: 4 abr. 2025.

MACEIÓ (Município). **Avenida Pierre Chalita é interditada para limpeza em área de deslizamento de terra.** ***Prefeitura de Maceió***, Maceió, 25 maio 2022. Disponível em:

https://maceio.al.gov.br/noticias/dmtt/avenida-pierre-chalita-e-interditada-para-limpeza-em-area-de-deslizamento-de-terra. Acesso em: 1 abr. 2025.

MASSAD, F. Técnicas de contenção e estabilidade de taludes. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2009.

MIGUEZ, M. G.; VERÓL, A. P. Soluções sustentáveis para drenagem urbana**. Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 19, n. 2, p. 123–132, 2014.

MIGUEZ, M. G.; VERÓL, A. P.; REZENDE, O. M. Drenagem urbana: do projeto tradicional à sustentabilidade. 1. ed. Rio de Janeiro: **Elsevier**, 2016.

MORAES, A. P. Procedimentos técnicos de dimensionamento da microdrenagem do município de Santo André**. XIX Exposição de Experiências Municipais em Saneamento.** Maio de 2015. Poços de Caldas – MG. 15 p. Disponível em: < Micro drenagem - calculos - De 24 a 29 de maio de 2015 – Poços de Caldas - MG Alexandre Perri de - Studocu>. Acesso em: 5 maio 2025.

OLIVEIRA G.G. Modelos para Previsão, espacialização e análise das áreas inundáveis na bacia hidrográfica do Rio Caí, RS. 2010, 149 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) **Universidade Federal do Rio Grande do Sul**, Porto Alegre, 2010.

OLIVEIRA, H. B. Análise de susceptibilidade a movimento de massa em talude na Avenida Pierre Chalita Maceió/AL. 2023. 86 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, **Universidade Federal de Alagoas**, Maceió, 2023.

OLIVEIRA, J. F.; SILVA, B. J.; SANTOS, R. M. Análise Geotécnica e Estabilidade de Taludes Urbanos em Maceió - AL: O Caso da Avenida Pierre Chalita. **Revista Brasileira de Geotecnia**, 2012.

OLIVEIRA, R. A.; AMARAL, R. L. Revegetação e controle de erosão em taludes de estradas: uma abordagem ambiental. **Revista Brasileira de Geotecnia Ambiental**, v. 11, n. 2, p. 73–85, 2017.

PACHECO, A. P; et al. **Classificação de pontos LIDAR para a geração do MDT**. Boletim de Ciencias Geodesicas, 2011.

PINTO, C. S. Curso básico de mecânica dos solos para engenheiros. 6. ed. São Paulo: **Oficina de Textos**, 2006.

PREFEITURA DE MACEIÓ. **Relatório Técnico de Inspeção da Infraestrutura Urbana: Avenida Pierre Chalita**. Maceió: Secretaria Municipal de Infraestrutura, 2022.

RODRIGUES, J. W. S.; SILVA JUNIOR, M. A. B. Análise dos indicadores de fragilidade do sistema de drenagem urbana aplicados em microbacia da região amazônica. **Meio Ambiente (Brasil), v. 4, n. 1, p. 88–105, jan./jun. 2024**. Disponível em: https://meioambientebrasil.com.br/index.php/MABRA/article/view/496. Acesso em: 4 abril 2025.

RODRIGUES, J. W. S.; SILVA JUNIOR, M. A. B.; LIMA, M. C. A. de. Indicadores de fragilidade de sistemas de drenagem urbana como suporte à avaliação do desempenho: uma

revisão sistemática da literatura. **CONTRIBUCIONES A LAS CIENCIAS SOCIALES**, *[S. l.]*, v. 17, n. 8, p. e9133, 2024. DOI: 10.55905/revconv.17n.8-055. Disponível em: https://ojs.revistacontribuciones.com/ojs/index.php/clcs/article/view/9133. Acesso em: 08 abr. 2025.

ROQUE, L. A. (2013). Áreas de Risco Geológico-geotécnico Associadas a Movimentos de Massas no Núcleo Urbano de Viçosa – MG. Dissertação de Mestrado**, Universidade Federal de Viçosa**, Viçosa, MG, 97 p.

SÁ, A. S. Uso de geotecnologias para o mapeamento da fragilidade ambiental do perímetro irrigado de São Gonçalo no município de Sousa – PB. 2016. 74 f. Monografia (Graduação em Geografia) – **Universidade Federal de Campina Grande**, Cajazeiras, 2016.

SÁ, Francisco das Chagas Moreira de. *Uso de geotecnologias para o mapeamento da fragilidade ambiental do Perímetro Irrigado de São Gonçalo no município de Sousa - PB.* 2016. 93 f. Monografia (Graduação em Geografia) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar, Sousa, 2016.

SANTOS JÚNIOR, L. M. Estudos Geotécnicos em Regiões Urbanas: Desafios e Soluções para Estabilidade de Taludes. **Editora Geotécnica**, 2013.

SANTOS JÚNIOR, V. J. dos. Avaliação da fragilidade no sistema de drenagem pluvial urbana: o caso da bacia hidrográfica do córrego das Melancias em Montes Claros – G**. Revista Monografias Ambientais**, [S. l.], v. 13, n. 5, p. 3986–3997, 2014. DOI: 0.5902/2236130815125. Disponível em: https://periodicos.ufsm.br/remoa/article/view/15125. Acesso em: 27 jan. 2025.

SCOZ, V., Estudo da estabilidade e dimensionamento de um talude em solo. Trabalho de conclusão de curso em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis/SC, 2002.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – SGB/CPRM. *Mapeamento geológico e de recursos minerais da Bacia de Alagoas: dados vetoriais*. Brasília: CPRM, 2022. Disponível em: https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/24474. Acesso em: 4 abril 2025.

SILVA, B. J.; SANTOS, R. M.; OLIVEIRA, J. F. Plano de Manejo de Águas Pluviais e Análise Geotécnica: O Caso do Município de Alagoinhas - BA. 2004.

SILVA, M. R.; OLIVEIRA, A. P.; NASCIMENTO, L. S. (2020). Aplicação de VANTs no mapeamento urbano e monitoramento ambiental. Revista Geotecnologias, v. 10, n. 2, p. 45-58.

SOUZA, M. A. A.; MENDONÇA, E. C. Uma metodologia multiobjetivo e multicritério para avaliação de desempenho de sistemas de drenagem urbana. Ingeniería del Agua, Valencia, v. 23, n. 2, p. 89–106, abr. 2019. DOI: https://doi.org/10.4995/ia.2019.10214. Disponível em: https://polipapers.upv.es/index.php/IA/article/view/10214. Acesso em: 5 maio 2025.

SOUZA, V. C. B. Gestão da drenagem urbana no Brasil: desafios para a sustentabilidade. ***Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais*****,** v. 1, n. 1, p. 58–72, 2013. DOI: 10.9771/gesta.v1i1.7105. Disponível em: https://periodicos.ufba.br/index.php/gesta/article/view/7105. Acesso em: 2 abril 2025.

STEINER, L. Avaliação do sistema de drenagem pluvial urbana com aplicação do índice de fragilidade. Estudo de caso: microbacia do Rio Criciúma, SC. 2011. 106 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Ambiental) – **Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC**, Criciúma, 2011.

TEIXEIRA, G. da S.; RODRIGUES, R. S. S.; CRISPIM, D. L.; FERNANDES, L. L.; BITTENCOURT, G. M. Methodologies for characterization and evaluation of urban drainage systems: a review. Research, Society and Development, [S. l.], v. 9, n. 4, p. e197943063, 2020. DOI: https://doi.org/10.33448/rsd-v9i4.3063. Disponível em: https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/3063. Acesso em: 5 maio 2025.

TUCCI, C. E. M. Drenagem urbana: conceitos básicos. Porto Alegre: ABRH, 2002.

TUCCI, C. E. M. Gestão da Drenagem Urbana. Brasília, DF: CEPAL. **Escritório no Brasil/IPEA**, 2012.

TUCCI, C. E. M. Gestão de águas urbanas. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2008.
TUCCI, C. E. M.; BELTRAME, L. F. de S. Evaporação e evapotranspiração. In: TUCCI, Carlos Eduardo Morelli (Org.). Hidrologia: ciência e aplicação. 2. ed. Porto Alegre: **Editora da Universidade; ABRH, 1997. p. 253–277.**

WAGNER, W.; et al. **From single-pulse to fullwaveform airborne laser scanners: potential and practical challenges.** In: ISPRS Congress. Geo-Imagery Bridging Continents: proceedings (International archives of photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences. Istanbul, 2004.