



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
INSTITUTO DE FILOSOFIA, CIÊNCIAS HUMANAS E SOCIAIS/IFCHS
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA
DOUTORADO EM GEOGRAFIA**



**VULNERABILIDADE AMBIENTAL A PROCESSOS DE
VOÇOROCAMENTO NA AM-010 (MANAUS/ITACOATIARA)**

Anne Carolina Marinho Dirane

Orientador: Dr. Antonio Fábio Sabbá Guimarães Vieira
Orientador

Manaus/AM - 2025

ANNE CAROLINA MARINHO DIRANE

**VULNERABILIDADE AMBIENTAL A PROCESSOS DE
VOÇOROCAMENTO NA AM-010 (MANAUS/ITACOATIARA)**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Geografia da Universidade Federal do Amazonas, como requisito parcial para a obtenção do título de doutora em Geografia.

Linha de Pesquisa: Domínios da Natureza na Amazônia. Orientador: Prof. Dr. Antonio Fábio Sabbá Guimarães Vieira

Manaus/AM -2025

Ficha Catalográfica

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

D597v Dirane, Anne Carolina Marinho
Vulnerabilidade ambiental a processos de voçorocamento na AM-010 (Manaus/Itacoatiara) / Anne Carolina Marinho Dirane . 2025
137 f.: il. color; 31 cm.

Orientador: Antonio Fábio Sabbá Guimarães Vieira
Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Federal do Amazonas.

1. Vulnerabilidade. 2. Ambiental. 3. Voçoroca. 4. Rodovia. I. Vieira, Antonio Fábio Sabbá Guimarães. II. Universidade Federal do Amazonas III. Título



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
INSTITUTO DE FILOSOFIA, CIÊNCIAS HUMANAS E SOCIAIS/IFCHS
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA
DOUTORADO EM GEOGRAFIA**



**VULNERABILIDADE AMBIENTAL A PROCESSOS DE
VOÇOROCAMENTO NA AM-010 (MANAUS/ITACOATIARA)**

Anne Carolina Marinho Dirane

**Dr. Antonio Fábio Sabbá Guimarães Vieira
Orientador**

**Dr. Deivison Carvalho Molinari
Membro interno da banca**

**Dr. Rogério Ribeiro Marinho
Membro interno da banca**

**Dra. Neliane de Sousa Alves
Membro externo da banca**

**Dra. Maria do Socorro Bezerra de Lima
Membro externo da banca**

*Dedico este trabalho a minha irmã, **Tatiana Dirane**, por toda compreensão, apoio e acolhimento. Por sempre acreditar em mim, até mesmo quando eu não acreditei.*

AGRADECIMENTOS

A **Deus**, por me permitir ingressar no doutorado e finalizar a tese.

Ao meu orientador, o professor **Dr. Antonio Fábio Sabbá Guimarães Vieira**, por não desistir de mim, ser paciente e flexível, compartilhando seus conhecimentos e me orientando da melhor forma possível. Obrigada por fazer parte da minha vida como pesquisadora, é uma honra tê-lo como orientador, mesmo que isso não tenha ficado claro ao longo dessa jornada, acredite.

Agradeço a **Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazona - FAPEAM** por possibilitar através do fomento o andamento da pesquisa.

Aos membros da banca examinadora, composta pelos professores **Dr. Deivison Carvalho Molinari, Dr. Rogério Ribeiro Marinho, Dra. Neliane de Sousa Alves e Dra. Maria do Socorro Bezerra de Lima**, pelas valiosas contribuições que enriqueceram esta pesquisa, além de fortalecerem o rigor acadêmico e as boas práticas científicas.

Aos meus pais, **Jânio Dirane e Vânia Marinho** (*in memorian*) por todos os ensinamentos transmitidos ao longo da minha criação, pelos valores repassados e por terem me incentivado a sempre estudar, acreditar e nunca desistir.

A minha irmã amada **Tatiana Dirane**, por sempre estar ao meu lado, sendo o meu maior suporte e melhor incentivo, me mostrando diariamente que desistir não é uma opção.

Ao **Dr. Armando Brito da Frota Filho**, por sempre me apoiar, me incentivar e puxar a minha orelha quando necessário, me colocando sempre no caminho da pesquisa e compartilhando sempre o seu melhor, não o que sobrava, quando precisava do seu tempo.

À **Thaline Ferreira Fontes**, por aguentar os meus grandes desabafos e sempre me responder com gentileza, com calma e paciência, sendo o meu braço direito e as minhas pernas, quando em alguns momentos fiquei estagnada no caminho.

Aos colegas de laboratório e irmãos de orientação, **Gabriela Mendonça, André Campos e Bruno Sarkis**, por me socorrem nos momentos de precisão e com urgência.

Ao querido **Roberto Epifânio**, por todo apoio e ajuda nos trabalhos de campo, pela força e incentivo.

A minha querida amiga, **Maria de Jesus**, por todo carinho e gentileza a mim ofertado, por todos os momentos de descontração e atenção, por deixar a minha jornada mais leve, por ser sempre o rostinho familiar que me sorria, nos momentos de angústia e aflição e por sempre se fazer presente.

A minha preciosa amiga **Dra. Émadina Gomes Rodrigues**, pelo incentivo de sempre, por todas as palavras de auxílio e acolhimento. Gratidão por ter você por perto nessa jornada.

À Dra. **Vanessa Kerolyn Araújo Meireles** por ser a minha pessoa, de todas as horas e para todas as horas.

Aos amigos **Dr. Deivison Carvalho Molinari** e **Dra. Neliane de Sousa Alves**, por todo incentivo e inspiração, ao longo da minha jornada acadêmica e profissional.

As minhas parceiras, **Carina Leal** e **Daniele Baraúna**, por se fazerem presentes e pelo incentivo de sempre.

A tia **Jussara Dirane**, por sempre acreditar e me proteger com suas orações, me amando incondicionalmente.

A minha querida e paciente amiga **Ranniele Queiroz**, por sempre me motivar e me lembrar de que o querer é poder.

Aos meus amigos **Saolo Andrade** e **Anna do Valle**, por todo o apoio e conversas, nos momentos alegres e angustiantes, por me auxiliarem na descoberta de novas perspectiva e olhares sobre o mundo e sobre mim mesma.

Ao **Victor Hugo Salles**, não apenas por aceitar o desafio de realizar as correções e adequar este trabalho às normas da ABNT em tempo recorde, mas também por sua gentileza e altruísmo, que me não me deixam esquecer da importância de cultivar o bem.

Por último e não menos importante, a minha querida amiga “tia” **Cleide Andrade**, por sempre me receber, me acolher, me alimentar e me amar. Por me incorporar à sua família e por todos os conselhos e conversas maduras, que certamente contribuíram para o meu progresso.

Obrigada!!

*“A vida me ensinou a nunca desistir
Nem ganhar, nem perder, mas procurar
evoluir
Podem me tirar tudo que tenho
Só não podem me tirar as coisas boas que eu
já fiz pra quem eu amo
E eu sou feliz e canto e o universo é uma
canção
E eu vou que vou”*

**Dias de luta, dias de gloria
Canção de Charlie Brown Jr.**

RESUMO

A pesquisa sobre a erosão do solo é fundamental devido ao seu impacto direto no ambiente natural e na sociedade. Neste estudo, parte-se da tese de que a formação de voçorocas ao longo da rodovia AM-010 está diretamente relacionada a fatores ambientais, como declividade e índice pluviométrico, e às intervenções humanas, especialmente as obras de infraestrutura e a redistribuição do solo. Para comprovar essa relação, a pesquisa adaptou uma abordagem metodológica voltada para a avaliação da vulnerabilidade ambiental à perda de solo. A conservação do solo e a proteção dos ecossistemas são aspectos essenciais para minimizar os impactos ambientais e reduzir o desenvolvimento de áreas de risco. Atualmente, avanços tecnológicos, como o uso do geoprocessamento, têm facilitado as investigações sobre erosão, especialmente no mapeamento da vulnerabilidade ambiental à perda de solo. A rodovia Deputado Vital de Mendonça, mais conhecida como rodovia AM-010, foi escolhida como objeto de estudo devido à ocorrência de voçorocas ao longo de suas margens. O primeiro mapeamento dessas incisões ocorreu em 2014, registrando 15 voçorocas. No entanto, após a reconstrução da rodovia em 2023, esse número foi reduzido para apenas uma. Já no monitoramento em 2025, foram identificadas cinco novas voçorocas. Para compreender a dinâmica de formação dessas incisões, a pesquisa teve como objetivo adaptar uma metodologia que levasse em consideração as características da região para avaliar a vulnerabilidade ambiental à perda de solo. Para isso, foi necessário descrever as voçorocas, mapear as canaletas, caracterizar o relevo e sua relação com o processo erosivo, além de estabelecer variáveis e atribuir pesos para declividade, índice pluviométrico, uso e cobertura da terra, solos e geologia. Para alcançar os objetivos, foram realizados levantamentos bibliográficos, trabalhos de campo, obtenção de produtos de sensoriamento remoto (SRTM, CHIRPS) e análises com ferramentas de geoprocessamento. Os resultados indicaram que a rodovia AM-010 possui áreas mais vulneráveis à erosão, principalmente em trechos de maior declividade, onde o índice pluviométrico é mais intenso e há influência do uso e cobertura do solo, que nesse caso se refere às intervenções realizadas na rodovia. O mapeamento da vulnerabilidade ambiental à perda de solo revelou que 23,75% da área apresenta baixa vulnerabilidade, 27,28% média vulnerabilidade e 48,97% alta vulnerabilidade. A correlação entre esses dados e a distribuição das voçorocas ao longo da rodovia confirmou que os trechos mais vulneráveis são aqueles com maior declividade e altos índices pluviométricos.

Palavras chaves: vulnerabilidade ambiental, voçoroca, rodovia

ABSTRACT

Soil erosion research is fundamental due to its direct impact on the natural environment and society. This study is based on the thesis that the formation of gullies along the AM-010 highway is directly related to environmental factors, such as slope and rainfall index, and human interventions, especially infrastructure works and soil redistribution. To prove this relationship, the research adapted a methodological approach focused on assessing environmental vulnerability to soil loss. Soil conservation and ecosystem protection are essential aspects to minimize environmental impacts and reduce the development of risk areas. Currently, technological advances, such as the use of geoprocessing, have facilitated investigations into erosion, especially in mapping environmental vulnerability to soil loss. The highway known as AM-010 was chosen as the object of study due to the occurrence of gullies along its margins. The first mapping of these incisions occurred in 2014, recording 15 gullies. However, after the reconstruction of the highway in 2023, this number was reduced to just one. In the 2025 monitoring, five new gullies were identified. To understand the dynamics of formation of these incisions, the research aimed to adapt a methodology that would take into account the characteristics of the region to assess environmental vulnerability to soil loss. For this, it was necessary to describe the gullies, map the ditches, characterize the relief and its relationship with the erosive process, in addition to establishing variables and assigning weights to slope, rainfall index, land use and cover, soils and geology. To achieve the objectives, literature reviews, field work, obtaining remote sensing products (SRTM, CHIRPS) and analyzes with the software ArcGIS 10.8 were carried out. The results indicated that the AM-010 highway has areas more vulnerable to erosion, mainly in stretches of greater slope, where the rainfall index is more intense and there is influence of land use and cover, which in this case refers to interventions carried out on the highway. The mapping of environmental vulnerability to soil loss revealed that 23.75% of the area has low vulnerability, 27.28% medium vulnerability and 49.97% high vulnerability. The correlation between these data and the distribution of gullies along the highway confirmed that the most vulnerable stretches are those with greater slope and high rainfall indices. In addition, areas where the soil is exposed or has been removed from its original location and deposited in another segment of the highway, due to infrastructure works, associated with the presence of ditches, favor the development of gullying.

Keywords: vulnerability, gullying, highway

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Construção da AM 010 na década de 50.	20
Figura 2 - Localização da Rodovia AM 010.	21
Figura 3 - Geologia da AM 010 24	24
Figura 4 - Unidades Geomorfológicas da AM 010.	26
Figura 5 - Solos da AM 010.	29
Figura 6 - Mapa de precipitação da rodovia AM – 010/AM.	32
Figura 7 - Precipitação na rodovia AM-010.	33
Figura 8 - Vegetação na rodovia AM-010.	34
Figura 9 - Cobertura Vegetal da AM-010.	35
Figura 10 - Hidrografia da rodovia AM-010.	37
Figura 11 - Voçoroca no Km 135, AM-010 (Manaus – Itacoatiara).	50
Figura 12 - Etapas da pesquisa.	53
Figura 13 – Equema dos procedimentos metodológicos.	54
Figura 14 - Forma das voçorocas.	56
Figura 15 - Modelo de evolução das voçorocas.	57
Figura 16 - Modelo dos tipos de relevo.	59
Figura 17 - Etapas do mapeamento temático.	61
Figura 18 - Procedimentos operacionais do geoprocessamento.	69
Figura 19 – Variáveis e pesos para o mapeamento da vulnerabilidade.	70
Figura 20 : Cronologia da construção e reconstrução da AM-010.	73
Figura 21 – Solo retirado de km 137 da rodovia AM-010 e depositado no km 148.	74
Figura 22 - Resultado da alteração da rodovia AM-010, km 117, Figura A (2014) e figura B (2024).	74
Figura 23 - Voçorocas mapeadas na rodovia AM-010.	75
Figura 24 - Resíduo de relevo da rodovia AM-010.	76
Figura 25 - Esquema de faixas laterais inseridos na rodovia AM-010.	76
Figura 26 - Rodovia AM-010 ampliada com faixa lateral.	77
Figura 27 - Canaletas ao longo da rodovia AM-010.	77
Figura 28 - Canaletas favorecendo o escoamento superficial concentrado.	78
Figura 29 – Canaletas e o solo exposto na rodovia AM-010.	79
Figura 30 – Trecho da rodovia AM-010 (A - 2024) e (B – 2025) com vegetação decorrente da hidrossemeadura,	79
Figura 31 - Terraceamento na vertente, rodovia AM-010.	80
Figura 32 - Voçorocas mapeadas no km 104, AM-010 (2014).	80
Figura 33 - Voçoroca km 104, AM-010 (2024).	81
Figura 34 – Voçoroca e conjunto de sulcos localizados no km 32, AM-010.	81
Figura 35 - Depósitos tecnogênicos, rodovia AM-010.	82
Figura 36 - Formação de sulco em superfície com depósito de material inconsolidado.	83
Figura 37 : - Mapa de declividade da rodovia AM-010.	85
Figura 38 - Mapa de índice pluviométrico da rodovia AM-010.	87
Figura 39 - Mapa de uso e ocupação da terra.	90
Figura 40 - Mapa de solos, rodovia AM-010.	92
Figura 41 - Solo exposto na rodovia AM-010.	93
Figura 42 – Geologia da Rodovia AM-010.	94
Figura 43 - Mapa de perfil da vertente, AM-010.	96
Figura 44 - Esquema de coleta de dados d curvatura vertical e horizontal.	98

Figura 45 - Perfil e direção do fluxo na vertente.....	98
Figura 46 - Mapa de curvatura vertical, rodovia AM-010.	99
Figura 47 -Vulnerabilidade ambiental a perda de solos na rodovia AM-010.	105
Figura 48 – Mapeamento da vulnerabilidade ambiental à perda de solo da rodovia AM-010 (Adaptada)	109
Figura 49 – Depósito tecnogênico ao longo da rodovia AM-010.	112
Figura 50 - Canaletas presentes na rodovia AM-010/Amazonas.	114
Figura 51 - Principais tipos de canaletas encontradas na rodovia AM-010/Amazonas.	116
Figura 52 – Captação da água da chuva para canaleta, Am-010/Amazonas.....	116
Figura 53 – Distribuição das canaletas e das voçorocas na rodovia AM-010/Amazonas.	118
Figura 54 – Disposição das canaletas na vertente, AM-010/Amazonas.	119
Figura 55 – Rupturas nas canaletas, AM-010/Amazonas.	120
Figura 56 – Depósito inconsolidado na rodovia AM-010/Amazonas.	120

LISTA DE QUADRO

Quadro 1 - Definição de vulnerabilidade por diversos autores.....	40
Quadro 2 - Conceitos de voçorocas.....	48
Quadro 3 - Escala de risco erosivo.....	58
Quadro 4 - Classificação das voçorocas por tamanho.....	58
Quadro 5 - Distribuição da classe de vulnerabilidade.....	61
Quadro 6 - Classificação de uso e cobertura da terra.....	65
Quadro 7 – Classes de solos.....	66
Quadro 8 - Classificação da Geologia.....	67
Quadro 9 - Escala de vulnerabilidade a erosão.....	70
Quadro 10 - Voçorocas cadastradas na rodovia AM-010 (2014) e situação atual (2025).	71
Quadro 11 – Voçorocas cadastradas em 2025 na rodovia AM-010.....	82
Quadro 12 - Escala de vulnerabilidade á denudação das rochas na rodovia AM-010	101
Quadro 13 - Valores de vulnerabilidade/estabilidade para tipos de solos.....	101
Quadro 14 - Grau de Vulnerabilidade para a classe de vegetação.....	102
Quadro 15 - Vulnerabilidade a perda de solo para o índice pluviométrico.....	102
Quadro 16 - Vulnerabilidade para dissecação, amplitude altimétrica e declividade do relevo.....	103
Quadro 17 – Variáveis e pesos para o mapeamento da vulnerabilidade (proposta do autor).....	107
Quadro 18 – Variáveis e pesos utilizados no mapeamento da vulnerabilidade	110

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Vulnerabilidade a perda de solo com metodologia proposta por Crepani (2001).	104
Gráfico 2 -Vulnerabilidade à perda de solo (Adaptado).....	110
Gráfico 3 – Característica da drenagem artificial	115

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA – Agência Nacional de Águas

ANNEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

CPRM – Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais

CHIRPS - Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Stations

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

ODS – Objetivos do Desenvolvimento Sustentável

RADAM – Radar da Amazônia

SIG – Sistema de Informações Geográficas

SRTM - Shuttle Radar Topography Mission

ZEE – Zoneamento Ecológico Econômico

SUMÁRIO

1.	<i>INTRODUÇÃO</i>	15
2.	<i>ÁREA DE ESTUDO</i>	19
2.1.	<i>Localização</i>	19
2.2.	<i>Geologia</i>	22
2.3.	<i>Geomorfologia</i>	25
2.4.	<i>Solos</i>	27
2.5.	<i>Clima</i>	31
2.6.	<i>Vegetação</i>	33
2.7.	<i>Hidrografia</i>	36
3.	<i>REFERENCIAL TEÓRICO</i>	38
3.1.	<i>Vulnerabilidade e Voçorocamento</i>	38
3.2.	<i>Vulnerabilidade Ambiental</i>	43
4.	<i>Processos e Fatores Erosivos</i>	45
4.1.	<i>Fatores Erosivos</i>	47
4.2.	<i>Voçoroca</i>	48
4.2.	<i>Geoprocessamento e a vulnerabilidade</i>	51
5.	<i>PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS</i>	52
5.1.	<i>Voçorocas rodovia AM-010</i>	55
5.2.	<i>Identificar a origem e condicionantes dos processos que causam a evolução das voçorocas</i>	59
5.2.1.	<i>Declividade</i>	61
5.3.	<i>Procedimentos Operacionais de Geoprocessamento</i>	68
6.	<i>RESULTADOS E DISCUSSÕES</i>	71
6.1.	<i>Mapeamento e caracterização das voçorocas e a rodovia AM – 010</i>	71
6.2.	<i>Mapa temático para declividade</i>	83

6.3.	<i>Mapa temático para índice pluviométrico.....</i>	86
6.4.	<i>Mapa temático para Uso e ocupação da terra.....</i>	88
6.5.	<i>Mapa temático para Solos.....</i>	91
6.6.	<i>Mapa temático para a Geologia</i>	93
6.7.	<i>Perfil topográfico da rodovia AM-010</i>	95
6.8.	<i>Vulnerabilidade à perda de solo conforme adaptação Crepani (2001)</i>	100
7.	<i>CONCLUSÃO</i>	122
8.	<i>REFERÊNCIAS.....</i>	124
9.	<i>ANEXOS.....</i>	136

1. INTRODUÇÃO

A descrição das vertentes, faz um relato a um sistema hidrodinâmico ajustado a um conjunto de fatores nos quais os materiais superficiais inconsolidados são sustentados por forças coesivas e de fricção, respectivamente de natureza química e física (Dirane, 2016). Sob este prisma, entender os processos atuantes nas vertentes, como a erosão dos solos e os movimentos de massa, constitui elemento fundamental para o estudo da evolução dessas formas de relevo (Guerra, 2006).

A erosão do solo, embora seja um fenômeno natural amplamente estudado, ainda apresenta desafios para sua compreensão, especialmente no que se refere à previsão espacial e temporal. Essa dificuldade decorre, entre outros fatores, da complexidade das interações entre os diversos elementos condicionantes, dos múltiplos mecanismos de ruptura do solo, das características do transporte de sedimentos e da crescente intervenção humana (Dirane, 2016). Além disso, as diferentes formas de erosão observadas na natureza estão associadas a processos específicos, o que torna ainda mais desafiador o desenvolvimento de estudos sobre o tema (Fernandes *et al.*, 2004).

A atuação da sociedade modifica a paisagem de diversas maneiras, seja pela remoção da cobertura vegetal, concentração de águas pluviais, cortes de encostas, entre outros. Tais intervenções podem ocasionar o surgimento de incisões erosivas, das mais simples, às mais agressivas, como as voçorocas, provocando danos ambientais e socioeconômicos.

Essas intervenções alteram o equilíbrio natural do solo e da hidrologia local, favorecendo o surgimento de processos erosivos. As erosões podem variar em intensidade, desde pequenas sulcos superficiais até grandes desníveis no terreno, como as voçorocas, que representam formas mais severas de erosão. Estas feições não apenas degradam o meio ambiente, comprometendo a fertilidade do solo e os recursos hídricos, mas também geram impactos socioeconômicos, como prejuízos à agricultura, destruição de infraestruturas e danos materiais.

A ação progressiva da erosão, no caso específico dos solos ao longo das rodovias, pode provocar situações de interrupção de tráfego, acidentes de consequências imprevisíveis, assim como dificultar as soluções de caráter corretivo (Rodrigues, 1995).

Os impactos ambientais ao longo das rodovias manifestam-se de diversas formas, incluindo o desmatamento, o assoreamento e a poluição de rios e igarapés, além da degradação do solo. Um dos problemas mais graves observados em algumas rodovias é o voçorocamento, que ocorre devido ao corte do relevo para a construção da estrada, às intervenções associadas às obras de infraestrutura e às características do solo da região. Esse processo erosivo intenso é mais frequente em áreas onde a construção da rodovia não levou em consideração a geomorfologia local. Em contrapartida, nos trechos onde o traçado da rodovia respeita as formas naturais do relevo, a incidência de voçorocas é significativamente reduzida, demonstrando a importância do planejamento adequado na construção de rodovias.

A construção de rodovias é fundamental para o crescimento econômico, o desenvolvimento social, a mobilidade da população e a circulação de mercadorias. No entanto, essa infraestrutura também gera impactos ambientais e sociais que precisam ser minimizados por meio de estudos e planejamento adequado. A adoção de estratégias bem estruturadas permite reduzir os prejuízos a longo prazo e mitigar os danos socioambientais decorrentes das obras dessa natureza.

Nesse contexto, o mapeamento da vulnerabilidade ambiental ao longo das rodovias torna-se essencial, pois possibilita a identificação de áreas mais sensíveis às intervenções humanas. Essas regiões são particularmente afetadas por modificações nas condições naturais do meio ambiente, como a supressão da vegetação, o corte de vertentes e a exposição do solo, processos que podem intensificar a degradação ambiental. Dessa forma, a realização de estudos prévios contribui para um planejamento mais sustentável, equilibrando o desenvolvimento e o ambiente natural.

A vulnerabilidade é uma importante ferramenta em estudos e planos voltados para os processos de tomada de decisão. Uma das formas de representação desta ferramenta é o mapa, tendo como objetivo a localização de áreas associadas ao valor de vulnerabilidade para fins de minimizar impactos e prevê problemas relacionados as rodovias.

Para fortalecer a metodologia de mensuração da vulnerabilidade, é necessário enfatizar o conhecimento sobre todas as partes que compõem o sistema, os espaços expostos ao risco, além de evidenciar os fatores que influenciam e produzem a vulnerabilidade.

Embora existam pesquisas sobre processos erosivos em rodovias que possuem conexão com a cidade de Manaus, a maioria foi analisada de forma isolada. Este estudo busca aprofundar o entendimento dos processos geodinâmicos superficiais na região.

A rodovia AM-010, que liga Manaus ao município de Itacoatiara, passando pelo município de Rio Preto da Eva, já serviu de área de estudo para algumas pesquisas (Dirane, 2016; Silva, 2021), no entanto, ao longo dos anos, a rodovia passou por algumas modificações, sofrendo alterações no relevo, propiciando a contenção/eliminação das voçorocas existentes ao longo da estrada.

Para Silva (2012) a ideia de vulnerabilidade está associada ao ponto mais fraco, mais exposto aos ataques, sendo sempre relacionado a maior ou menor fragilidade de um ambiente. Nesse sentido, a menor ou maior fragilidade são admitidos, mas ainda não são considerados elementos sociais como pertinentes à problemática. Portanto, os aspectos físicos e humanos são condicionantes que devem ser analisados para o mapeamento da vulnerabilidade.

Alguns trabalhos relacionados ao mapeamento de voçorocamento já foram realizados na AM-010 (Dirane, 2016; Silva, 2015; Silva, 2021) no entanto, há questionamentos que precisam ser respondidos, no que diz respeito ao surgimento de voçorocas em determinados trechos da rodovia, enquanto outro não há esse tipo de incisão.

O aprofundamento da vulnerabilidade em relação aos processos erosivos e a comparação com as voçorocas mapeadas, se faz necessário por vários fatores, o que inclui entender a dinâmica da vulnerabilidade e as metodologias que são utilizadas, uma vez que os parâmetros adotados, como índice pluviométrico sofre alterações nas diferentes regiões do Brasil.

Os processos geodinâmicos superficiais, associados à ação antrópica, mediante supressão vegetal, impermeabilização, concentração de águas pluviais por meio de canaletas, sem dissipador de energia, modificação da encosta e aberturas de rodovias, podem ocasionar processos erosivos, que vão desde a formação de pequenos sulcos, bem como o desenvolvimento de voçorocas (Vieira, 2008), gerando problemas ambientais, sociais e econômicos.

Pesquisas realizadas na Região Metropolitana de Manaus em 2015, 2016 e 2021 abordaram os processos erosivos ao longo das rodovias BR-174 (Carvalho, 2017), AM-010 (Dirane, 2016; Silva, 2021), AM-330 e AM-363 (Silva, 2015; Abreu, 2016). No entanto, ressalta-se a importância de uma investigação mais profunda, em decorrência da mobilidade, o fluxo intenso de veículos e o crescimento das cidades, o que reforça a necessidade de planejamento rodoviário.

Diante dessas razões, torna-se essencial compreender os processos erosivos, suas características específicas e a forma como se originam e evoluem. Além disso, é fundamental analisar as áreas afetadas e suas vulnerabilidades, contribuindo para um planejamento mais eficiente no desenvolvimento e manutenção das rodovias. Isso ajudaria na prevenção de danos ambientais e materiais, garantindo maior segurança e sustentabilidade para a infraestrutura viária.

A proposta de analisar a rodovia AM-010 (Manaus- Itacoatiara), surgiu de uma pesquisa desenvolvida em 2013/2014, que mapeou todas as incisões erosivas do tipo voçoroca na rodovia. No entanto, alguns questionamentos persistem, como entender o motivo da maior concentração de voçorocas em determinados pontos da rodovia. O propósito desta tese é avaliar a adaptação de uma metodologia empregada para determinar a vulnerabilidade ambiental a processo de voçorocamento, analisando se há a existência de um padrão na gênese das voçorocas e investigar se as feições erosivas possuem uma origem comum e se seguem processos semelhantes de desenvolvimento.

Assim, com vistas de analisar o surgimento das feições erosivas pelo viés da vulnerabilidade, é necessário entender o conceito e a abordagem do tema, tal como descreve Citter (2022), em que a vulnerabilidade é o potencial para perda e inclui elementos de exposição ao risco as circunstâncias que colocam as pessoas e as localidades em risco perante um determinado perigo, e elementos de propensão as circunstâncias que aumentam ou reduzem a capacidade da população, da infraestrutura ou dos sistemas físicos para responder a e recuperar de ameaças ambientais

Apesar dos conceitos serem considerados bem debatidos na literatura, estas definições tão simples e genéricas assimilam a essência da vulnerabilidade (Cutter, 1996; Birkmann, 2006).

As indagações acerca da temática vulnerabilidade ainda são bem complexas, pois a mesma pondera muitos fatores e procedimentos, pois o próprio termo vulnerabilidade conecta-se com diversas áreas da ciência (Frota Filho, 2016). A vulnerabilidade versa sobre a possibilidade de um determinado ambiente passar por um impacto, seja ele grande e irreversível, em um ambiente natural ou não.

A relevância deste estudo está em identificar as áreas mais vulneráveis à erosão ao longo da rodovia, utilizando uma metodologia que leve em conta as características da região. O objetivo geral da pesquisa é analisar a vulnerabilidade ambiental da Rodovia AM-010 (Manaus/Itacoatiara) a processos erosivos. Para isso, foi necessário descrever as voçorocas, caracterizar o solo e o relevo da via em sua relação com esses fenômenos e

adaptar uma metodologia específica para a AM-010, considerando as particularidades regionais na análise da vulnerabilidade à erosão.

Ao longo do desenvolvimento desta pesquisa, ocorreram algumas modificações em sua abordagem. Inicialmente, a área de estudo englobaria todas as rodovias da Região Metropolitana de Manaus, com foco central nas voçorocas. No entanto, durante o exame de qualificação, decidiu-se restringir a pesquisa à Rodovia AM-010, devido ao tempo disponível para a conclusão da tese e à extensa área inicialmente prevista, que abrangeria 13 municípios.

Além disso, o objeto central do estudo foi redefinido, uma vez que a rodovia passou por um processo de reconstrução, eliminando grande parte das voçorocas previamente mapeadas. Dessa forma, o enfoque da pesquisa foi direcionado para a adaptação de uma proposta metodológica voltada à análise da vulnerabilidade ambiental ao voçorocamento da AM-010, considerando as modificações estruturais ocorridas na rodovia.

A tese argumenta que a vulnerabilidade da Rodovia AM-010 à erosão é exacerbada por diversos fatores. Primeiramente, o solo escavado em intervenções viárias, frequentemente utilizado em aterros, carece de compactação ou estabilização, tornando-o vulnerável à erosão, sobretudo em épocas de chuva intensa. Além disso, a falta de dissipadores de energia e o dimensionamento inadequado das canaletas de drenagem agravam o problema, resultando na formação de voçorocas.

2. ÁREA DE ESTUDO

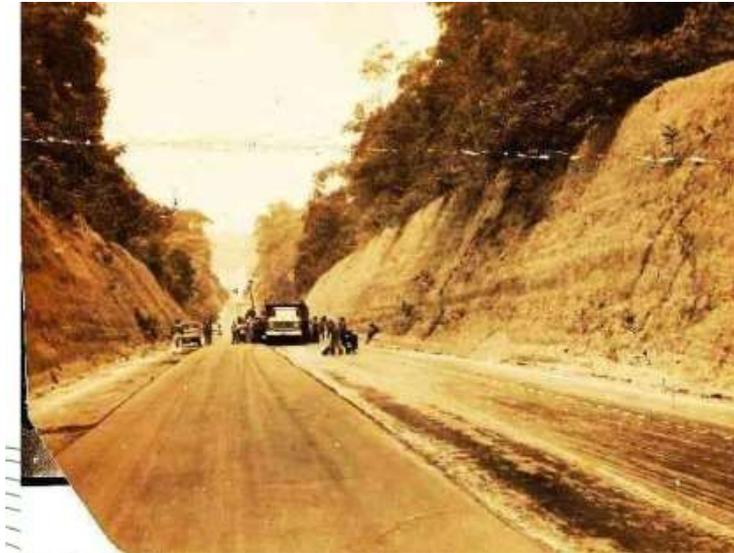
2.1. Localização

A rodovia AM-010, rodovia Torquato Tapajós ou Deputado Vital de Mendonça, umas das principais estradas estaduais do Estado do Amazonas, liga a cidade de Manaus diretamente aos municípios de Rio Preto da Eva e Itacoatiara, de forma indireta faz conexão com as rodovias AM – 363 e AM 330, que dão acesso aos municípios de Itapiranga e Silves, interligando com os municípios de São Sebastião do Uatumã, Urucará e Uricurituba (**figura 2**).

A estrada teve seu início na década de 50 (**Figura 1**), no governo de Plínio Ramos Coelho (1920-2001), passou pelo primeiro governo (1959-1963) de Gilberto Mestrinho

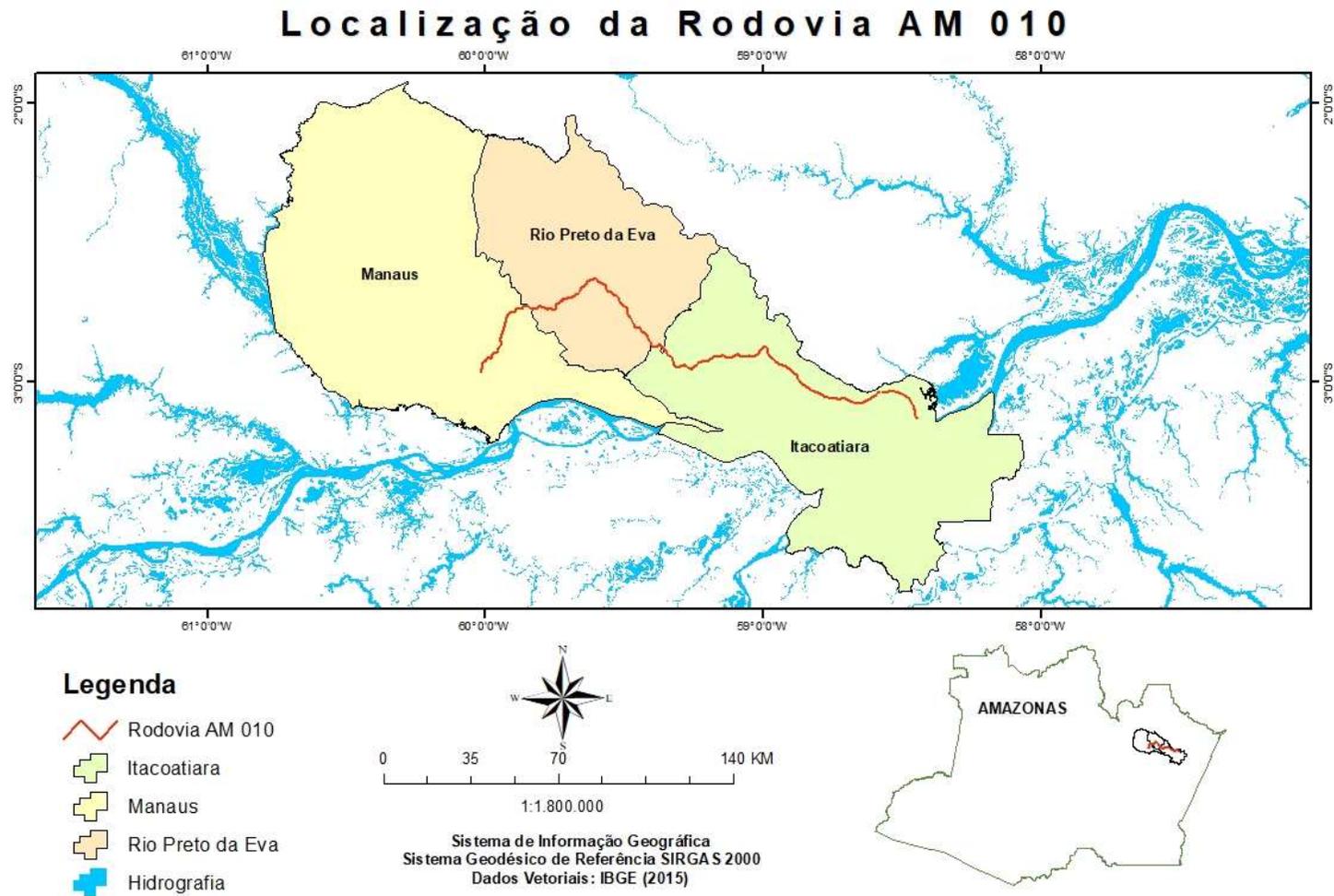
(1928-2009) e prosseguiu até a cassação, pela ditadura militar, do segundo mandato (1963-1964) do governador Plínio Coelho (Silva, 1965). Após retomada de sua obra, em ritmo acelerado, em meados de 1964, o então governador Arthur César Ferreira Reis, que concretizou a ligação entre as cidades de Manaus e Itacoatiara. No início, tinha uma extensão de 286 quilômetros, mas teve que ser reduzida para receber o asfalto, sofrendo modificações com as retiradas de suas muitas curvas, para ser asfaltada, no governo (1975-1979) do professor Henocho da Silva Reis (1907-1998), sofreu modificações e, após a retirada de muitas de suas curvas, foi encurtada para 266 quilômetros (Silva, 1965).

Figura 1- Construção da AM 010 na década de 50.



Fonte: Apresentação Consulta Pública SEINFRA, 2021.

Figura 2 - Localização da Rodovia AM 010.



Fonte: IBGE (2015). Org. Anne C. M. Dirane, 2024

2.2. Geologia

A geologia do Estado do Amazonas é caracterizada por uma extensa cobertura sedimentar fanerozóica, espalhada nas bacias Acre, Solimões, Amazonas e Alto Tapajós, que se depositou sobre um substrato rochoso pré-cambriano onde predominam rochas de natureza ígnea, metamórfica e sedimentar (CPRM, 2006).

No que se refere ao conjunto geotectônico a AM-010, corresponde à Cobertura Fanerozóica e envolve uma pequena porção do Cráton Amazônico (Escudo das Guianas) (Almeida, 1978). De acordo com Santos (2003), o Cráton Amazônico possui sua maior porção em território brasileiro, mas abrange também os territórios da Bolívia, Colômbia, Guiana, Paraguai, Suriname e Venezuela (Fachetti *et al.*, 2016/). É dividido pela Bacia Amazônica em duas partes: o Escudo das Guianas, ao Norte, e o Escudo Guaporé (ou escudo Brasil central), ao sul.

Com relação aos modelos de províncias geocronológicas, a área corresponde à Cobertura Fanerozóica da Bacia do Amazonas (Tassinari; Macambira, 1999 e 2004). A área que envolve a AM-010 envolve uma pequena porção do Cráton Amazônico, também conhecido como Escudo das Guianas. É uma área do continente sul-americano, composta por antigas e estáveis rochas, as quais formam a base do continente. Em termos de modelos de províncias geocronológicas, a área da AM-010 é considerada como parte da Cobertura Fanerozóica da Bacia do Amazonas.

A Bacia do Amazonas é uma grande bacia sedimentar localizada na região amazônica, e compreende uma vasta área de depósitos sedimentares que se formaram ao longo do tempo geológico. Possui aproximadamente 620.000 km² e abrange parte dos estados do Amazonas e Pará, com formato linear alongado na direção ENE-WSW (Ferreira *et al.*, 2015).

A Bacia Sedimentar do Amazonas pode ser classificada como uma bacia intracratônica e suas rochas sedimentares estão em *onlap*¹ sobre as rochas pré-cambrianas e a sua espessura sedimentar e ígnea total atinge aproximadamente 5.000 metros de profundidade (QUEIROZ, 2016).

¹ *Onlap*: Terminação de estratos de baixo ângulo contra uma superfície mais inclinada, normalmente marcando a terminação lateral proximal de unidades sedimentares (Holz, 2012).

Inserida na Formação Alter do Chão (**Figura 3**), que é a unidade mais representativa da região. A característica dessa formação permite distingui-la facilmente das unidades paleozóicas da Bacia do Amazonas. Esta formação está distribuída de leste a oeste na área de estudo, desde a cidade de Silves até o Município de Manacapuru. Ao longo da planície aluvionar do sistema Rio Solimões-Amazonas, a Formação Alter do Chão está coberta por depósitos aluvionares recentes e sub-recentes (Silva, 2005).

De acordo Silva (2005) essa unidade está constituída por arenitos finos a médios, com níveis argilosos, caulíníticos, inconsolidados, contendo grânulos de seixos de quartzo esparsos, com estratificação cruzada e plano-paralela. O nível basal compreende uma camada de arenito litificado, que foi denominado de “Arenito Manaus” por Albuquerque (1922), cuja terminologia é comumente usada na região.

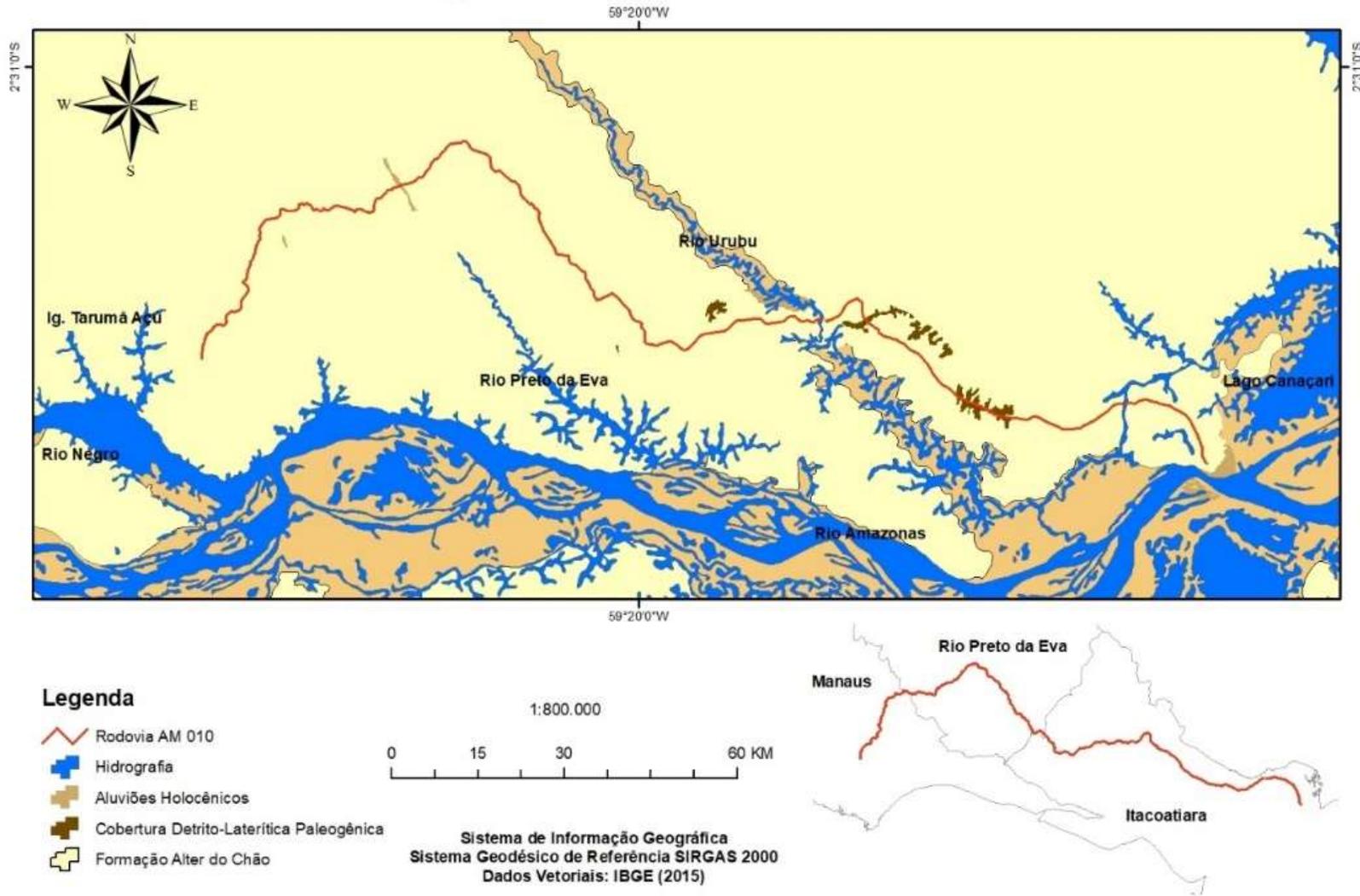
O “Arenito Manaus”, embora tenha denominação própria não é considerado um membro ou fácies distinta dessa referida formação. Este é caracterizado por arenitos e siltitos silicificados, em geral avermelhados, por vezes esbranquiçados (caulinítico), compacto, que apresentam estruturas sedimentares preservadas (estratificações plano-paralela e cruzadas), contendo fragmentos de madeira, restos de carvão preservados e marcas de raízes, distribuídos, mormente nas margens dos rios e igarapés da região. Estes são alvos de exploração em inúmeras pedreiras próximas a pequenos cursos d’água na região, cujo material é muito empregado como brita para construção civil.

Para Franzinelli *et al.* (2002), o “Arenito Manaus” está constituído basicamente por quartzo/arenito, supermadura, o que significa que passou por um intenso processo de intemperismo e transporte antes de se depositar. Ela é homogênea em sua composição, ou seja, não apresenta variações significativas em sua composição química ou mineralógica. A granulação do "Arenito Manaus" varia de média a grossa, o que indica que os seus grãos são relativamente grandes em tamanho. A seleção, que se refere à uniformidade de tamanho dos grãos, é pobre neste arenito, o que significa que há uma grande variedade de tamanhos de grãos presentes.

O "Arenito Manaus" também possui uma matriz de caulinita. A matriz é composta por minerais de argila, como a caulinita, que preenchem os espaços vazios entre os grãos de quartzo. Essa matriz de caulinita confere uma certa coesão e estabilidade ao arenito.

Figura 3 - Geologia da AM 010

Geologia da Rodovia AM 010



Fonte: IBGE (2015). Org. Anne C. M. Dirane, 2024.

Para explicar a origem da silicificação desse nível estratigráfico na Formação Alter do Chão, autores sugerem três fases de modificações diagenéticas: a) durante a fase deposicional (eogênese), b) durante o soterramento (mesogênese) e c) por soerguimento e erosão (telogênese), sob influência de fatores deposicionais, climáticos, tectônicos e de intemperismo (Franzinelli *et al.* 2002).

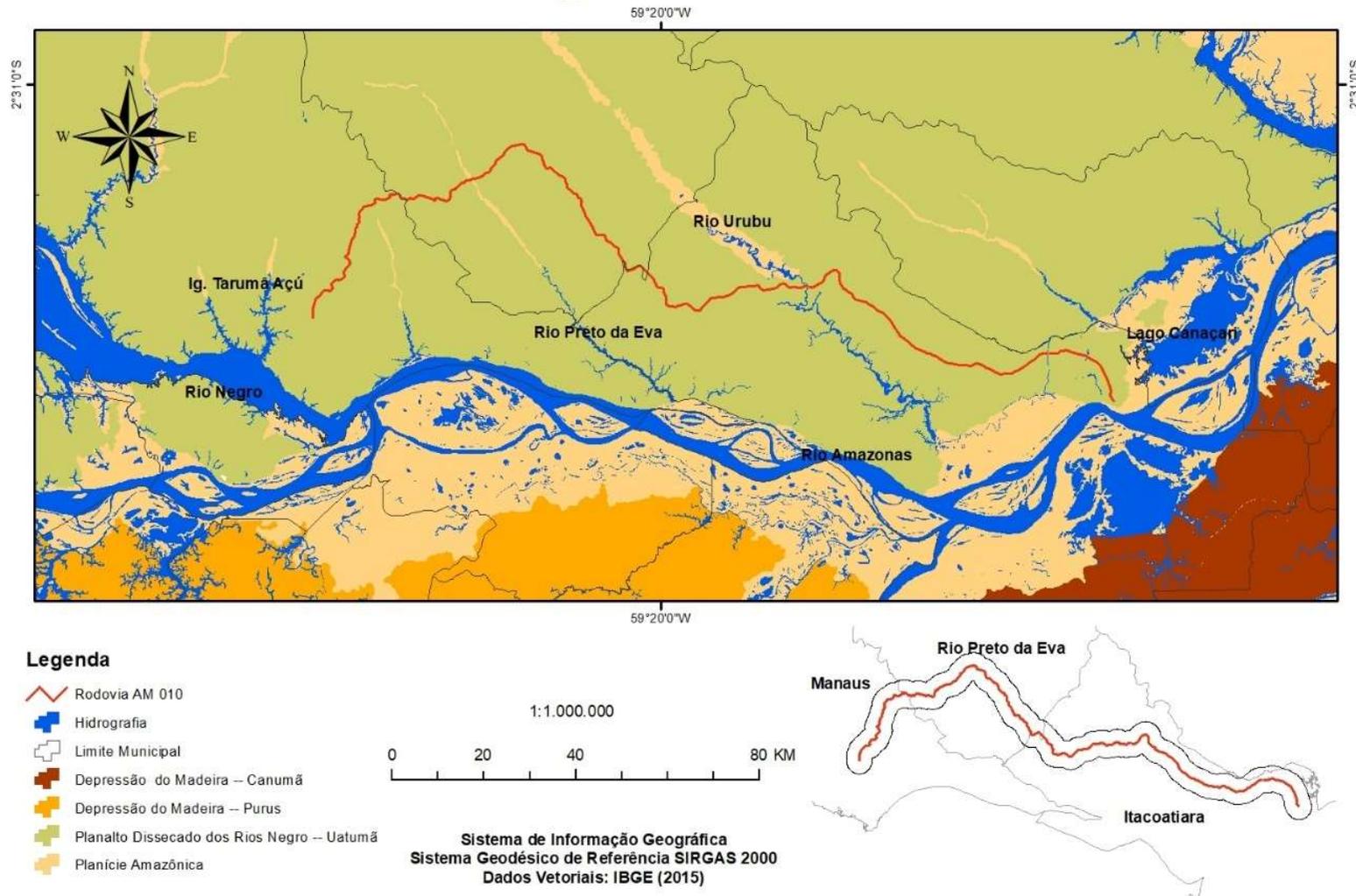
2.3. Geomorfologia

A maior unidade geomorfológica que representa a AM-010 (**Figura 4**), compreende o Planalto Dissecado Rio Negro – Rio Uatumã, cuja representação se dá por colinas pequenas e médias dissecadas, vales fechados e drenagens subdendríticas, desenvolvido em uma ampla superfície sobre a Formação Alter do Chão (Dirane, 2016). Há predominância de colinas, com cotas 50 m a 100 m marcadas por fortes rebordos erosivos abruptos com vales estreitos em V e zonas de interflúvios estreitas e alongadas (NW-SE e NE-SW) que separam amplas bacias de drenagens assimétricas (Silva, 2005). Em resumo, o Planalto Rebaixado Rio Negro é marcado por interflúvios e colinas tabulares dissecadas, topografia não superior a 100m e corresponde à área 49 de afloramento da Formação Alter do Chão, que no contato com o rio Amazonas forma margem do tipo falésia fluvial com altura de até 25m (Carvalho, 2012).

A Planície Amazônica é constituída por planícies de inundação e terraços fluviais bem amplos, atingindo dezenas de quilômetros de largura, ocorrendo ao longo dos principais canais-troncos da bacia hidrográfica dos rios Negro-Solimões-Amazonas (CPRM, 2010(corriger)). Tais formas de relevo apresentam, portanto, amplo destaque ao longo dos imensos fundos de vales dos rios Negro, Solimões, Amazonas, Madeira, Purus, Juruá, Javari, Negro, Içá e Japurá. As planícies e os terraços fluviais consistem nas únicas zonas deposicionais ativas na Amazônia. As planícies aluviais, normalmente recobertas por vegetação de igapó e matas de várzea adaptadas a ambientes inundáveis, são constituídas por depósitos sedimentares atuais ou subatuais (Araújo, 2018); os terraços fluviais são correlatos ao Pleistoceno Superior e as planícies de inundação, ao Holoceno (CPRM, 2010).

Figura 4 - Unidades Geomorfológicas da AM 010.

Geomorfologia da Rodovia AM 010



Fonte: IBGE (2015), Org. Anne C. M. Dirane, 2024.

A planície amazônica é constituída por terrenos transitoriamente inundáveis, que preenchem os vales dos cursos fluviais principais.

De acordo com Queiroz (2018), na região, desenvolve-se, preferencialmente na margem direita dos rios Solimões e Amazonas, formando as “terras baixas”, que são popularmente chamadas de várzea amazônica, que seguindo o controle do rio, formam extensas áreas baixas, de acordo com a dinâmica e o regime fluvial ao longo da calha do rio Amazonas e de seus afluentes de água branca.

Nesse contexto, são identificadas inúmeras formas deposicionais: furos, paranás, planícies de acreção em barras de pontal, planícies de decantação, ilhas fluviais, barras arenosas, lagos, diques marginais etc. (Latrubesse; Franzinelli, 2002).

Sua ocorrência se dá de forma descontínua, com relevos residuais de variadas formas. Alguns têm topos planos em forma de mesas, outros constituem cristas alongadas com encostas ravinadas, e outros ainda, cabeceiras de drenagem em forma de anfiteatros. Regionalmente, seus terrenos apresentam caimento para leste, em direção aos relevos aplainados da Depressão Marginal Norte do Amazonas (Nascimento, 2016).

A erosão e dissecação na planície Amazônica seguem duas direções principais: NW-SE (noroeste-sudeste) e NE-SW (nordeste-sudoeste). Essas direções refletem o arcabouço geológico-estrutural da região. Os interflúvios (áreas elevadas entre vales de rios) desenvolvem-se de maneira estreita e alongada, orientados na direção NW-SE. Um exemplo é o interflúvio das cabeceiras dos rios Preto da Eva e Urubu. Na porção norte dessa área, os interflúvios são mais amplos. Colinas alongadas orientadas NE-SW (nordeste-sudoeste) formam os divisores de sub-bacias, separando diferentes áreas de drenagem. Essas colinas são resultadas da estrutura geológica da região. As superfícies alongadas dos interflúvios e colinas refletem o arcabouço geológico-estrutural da região. Elas correspondem às principais direções estruturais identificadas por pesquisadores como Sternberg (1950), Nascimento et al. (1976), Franzinelli e Igreja (1990), Bemerguy (1997) e Costa et al. (2001).

2.4. Solos

A Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA (2006) realizou o levantamento e o mapeamento dos solos em diferentes escalas, no Estado do Amazonas,

na década de 80. No estado do Amazonas, a equipe de levantamento de solos EMBRAPA (2006) procedeu a levantamentos e mapeamentos em diferentes escalas, principalmente na década de 1980 (EMBRAPA, 1982, 1984). O Radar na Amazônia - RADAMBRASIL (1976) fez o levantamento dos solos do Amazonas em uma escala de 1:250.000, baseado em imagens de radar e coletas em pontos remotos da Amazônia (CPRM, 2010).

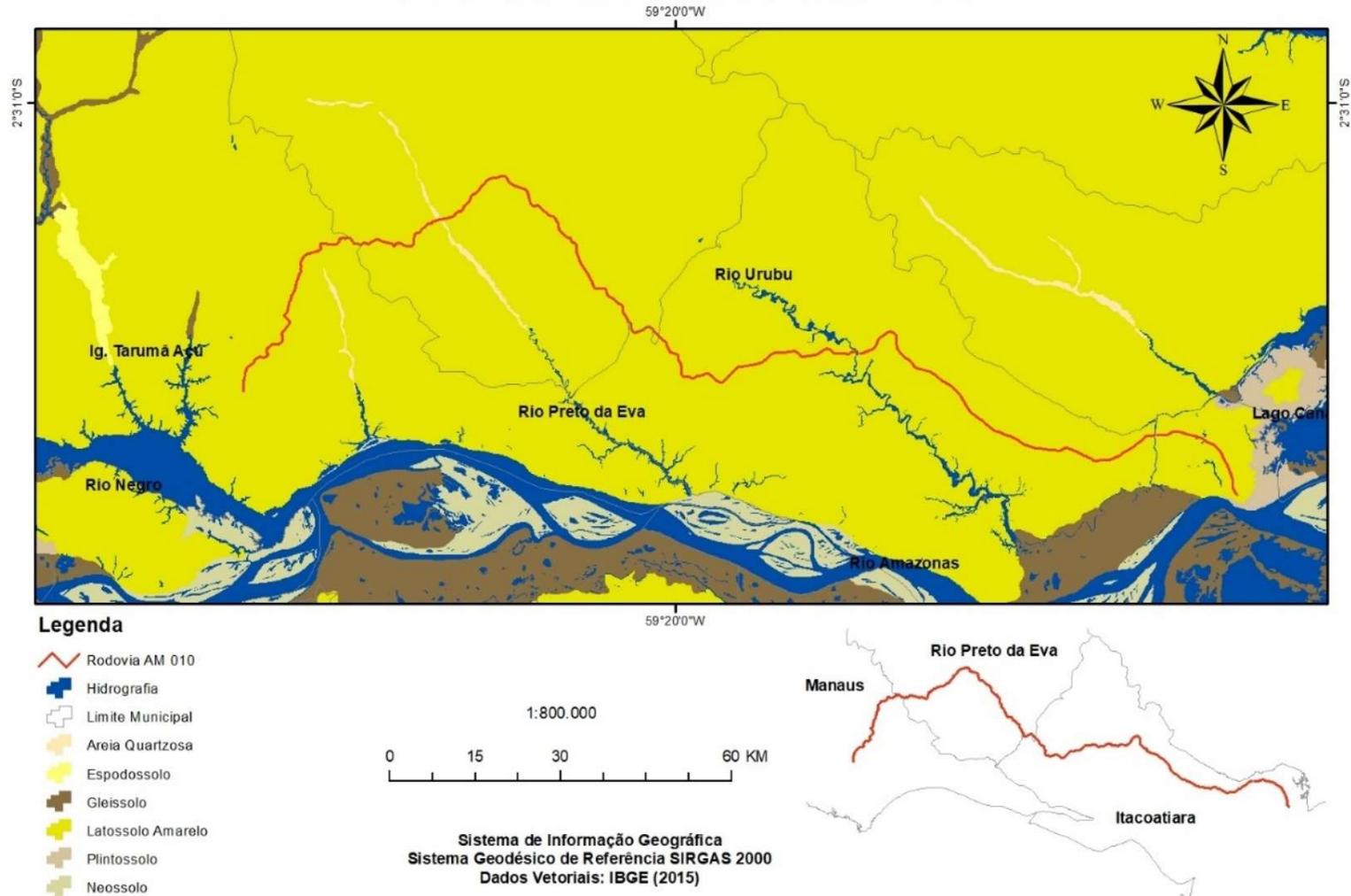
Na rodovia AM-010 há predominância de áreas inundáveis e áreas de terra firme. As áreas de várzea e igapó são compostas de solos recentes, provenientes do quaternário (Latrubesse; Franzinelli, 2005), à medida que as áreas de terra firme, apresentam solos mais antigos do Neogeno-Pleistoceno (Iron, 1984). Em meio as classes de solos predominantes na AM-010, temos os Latossolos, Gleissolos, Neossolos e Plintosso (**Figura 5**).

A Unidade pedogenética dos Latossolos compreendem solos minerais, não hidromórficos, que apresentam normalmente uma sequência de horizontes A, Bw [horizonte mineral bastante intemperizado, evidenciado por completa ou quase completa ausência (> 4%) de minerais primários facilmente intemperizáveis; apresentam estrutura forte muito pequena ou pequena granular, ou em blocos subangulares, bem como textura franco-arenosa ou mais fina e reduzidos teores de silte] (latossólico) e C, com pouca diferenciação entre os horizontes Bw e, em geral, com transição entre os horizontes plana e difusa (CPRM, 2010).

Os Latossolos existentes na região são profundos ou muito profundos, com espessuras quase sempre superiores a 2m. (Botschek et al., 1996; Lucas *et al.*, 1984; Marques *et al.*, 2004) Nos horizontes subsuperficiais, as argilas se encontram quase que em sua totalidade floculadas. A fração argila destes solos, na região, é de natureza essencialmente caulínica (Rodrigues *et al.* 1991; Silva, 1989). As estruturas dominantes são na forma de pequena granular (fortemente desenvolvida) e em blocos subangulares. A argila tem a capacidade de formar agregados no solo, cooperando para a formação de uma estrutura mais consistente. Uma baixa porcentagem de argila dispersa indica que esses agregados são mais estáveis, assim como a coesão e a estabilidade do solo, que são fatores cruciais na avaliação da resistência do solo à erosão. Quando há predomínio da estrutura granular, o solo adquire aspecto maciço poroso (Rodrigues, 1995).

Figura 5 - Solos da AM 010.

Solos da Rodovia AM 010



Fonte: IBGE (2015). Org. Anne C. M. Dirane, 2024.

No Amazonas ocorrem, predominantemente, Latossolos Amarelos; entretanto, há ocorrência, em menor escala, de Latossolos Vermelho-Amarelos e Latossolos Vermelhos.

Solos pouco profundos a rasos, com pequena diferenciação de horizontes, ausência de acumulação de argilas, textura franco-arenosa ou mais argilosa, cores normalmente amareladas e brunadas. A drenagem varia de acentuada a imperfeita e podem apresentar qualquer tipo de horizonte A sobre um horizonte B incipiente (Bi), também de cores diversas. Muitas vezes são pedregosos, cascalhentos e mesmo rochosos (AMAZONAS/ZEE, 2010).

Os Gleissolos solos minerais, hidromórficos, com horizonte glei dentro de 50 cm a partir da superfície ou em profundidade maior que 50 cm e menor ou igual a 150 cm. São solos mal ou muito maldrenados em condições naturais, e podem apresentar textura arenosa (areia ou areia franca) nos horizontes superficiais, desde que seguidos de horizonte glei de textura franco arenosa ou mais fina (Santos, 2018). São solos formados sob vegetação hidrófila ou higrófila herbácea, arbustiva ou arbórea.

A maioria das ocorrências no Amazonas apresenta encharcamento durante longos períodos do ano, o que resulta em condições anaeróbicas e consequente redução do íon férrico para o íon ferroso, no processo denominado gleização (CPRM, 2010) e apresentam elevada fertilidade (Teixeira *et al.*, 2008).

A classe dos plintossolos, de acordo com Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, são solos minerais que apresentam horizonte plíntico, que é camada em que a plintita está presente, pode variar em profundidade e espessura.

Esse horizonte mineral de espessura igual ou maior que 15 cm, caracterizado pela presença de plintita em quantidade igual ou superior a 15% por volume de solo; a plintita se refere a um material rico em óxidos de ferro, ou de ferro e alumínio, com a propriedade de endurecer irreversivelmente (petroplintita), sob efeito de ciclos alternados de umedecimento e secagem], petroplíntico ou litoplíntico (Santos, 2006).

Os plintossolos apresentam manchas ou mosqueados avermelhados (plintita), geralmente compondo um mosqueado de cores bem contrastantes (tons de amarelo e vermelho) com a matriz (geralmente esbranquiçada) (Shinzato *et al.*, 2005). Se formam em condições de drenagem pobre, frequentemente associadas a regiões de relevo plano ou suavemente ondulado, onde o acúmulo de água e a oscilação do lençol freático promovem a concentração de óxidos de ferro e alumínio.

2.5. Clima

O clima predominante em toda região é o tipo quente e úmido das florestas equatoriais, e corresponde ao clima Am na classificação de Köppen (1948 apud Araújo Neto; Moreira, 1976; Troppmair, 2012) caracteriza como Clima Equatorial com elevada precipitação anual de 1.500 a 4.000 mm distribuídas sobre os meses do ano. Mendonça e Oliveira (2007), ressaltam que o clima equatorial não apresenta grande amplitude térmica diária ou sazonal devido à grande umidade atmosférica e a intensa nebulosidade, com temperatura média de 27,9°C.

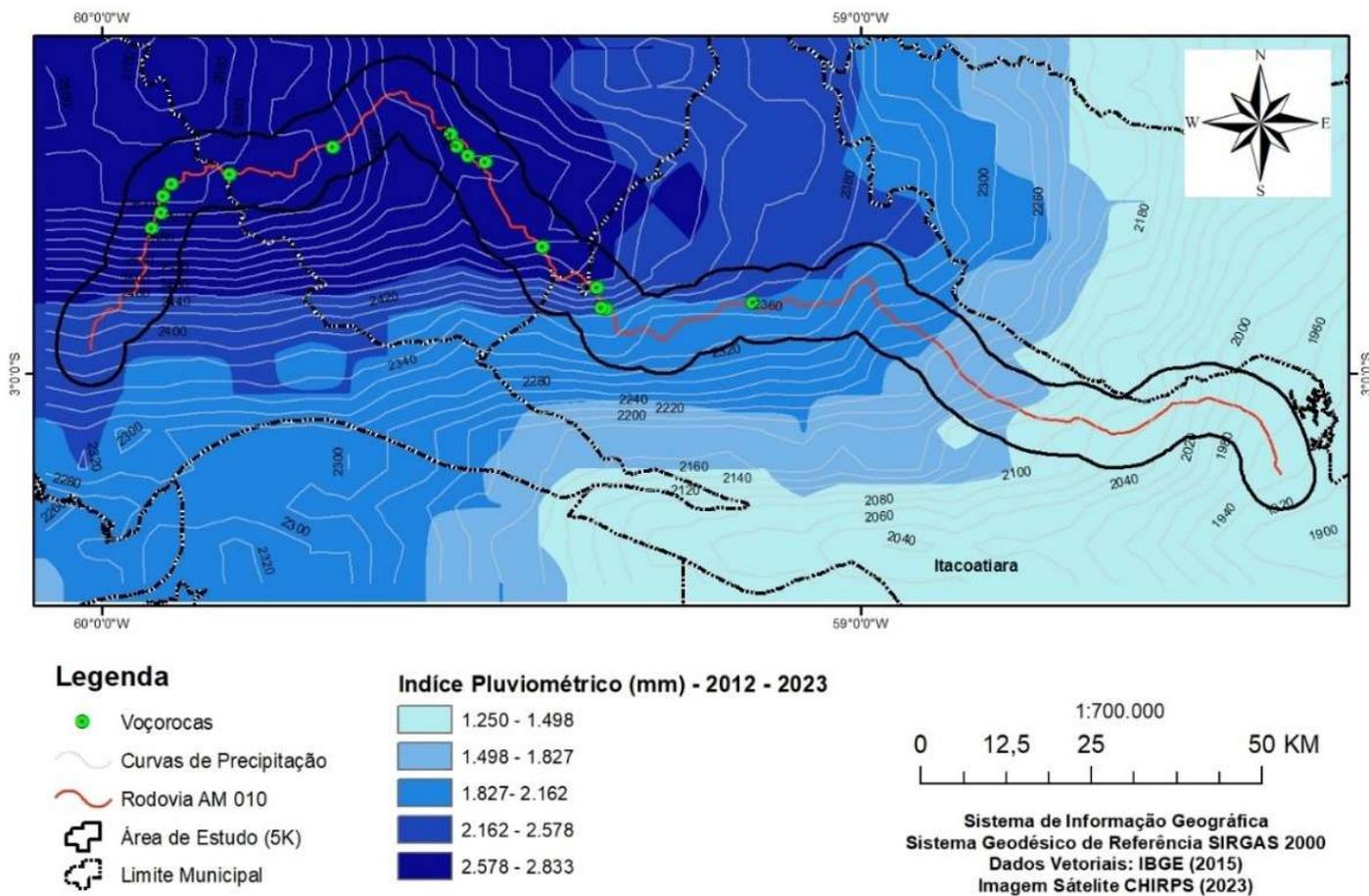
Conforme Fisch *et al.* (1998) o período de forte chuva na região amazônica corresponde entre os meses de novembro e março, sendo que, o período de seca ocorre entre os meses de maio e setembro. Nos meses de dezembro a fevereiro correm uma distribuição de chuvas com precipitação superior a 900 mm na parte oeste (Manaus e adjacência) e centro da Amazônia (Silva, 2021).

A precipitação, (**figura 6**) é a variável que altera as características dos demais elementos climáticos como temperatura e umidade (Fisch *et al.* 1998; Oliveira *et al.*, 2023) confirmam que a nebulosidade e precipitação determinam o clima amazônico a partir das demais variáveis locais e sistemas de fenômenos meteorológicos complexos, entre eles zona de convergência intertropical, atividade alta da Bolívia, as linhas de instabilidade, El Niño, La Niña e outras (Molion, 1987, 1993).

Ao longo da rodovia é perceptível a visualização da distribuição pluviométrica (**figura 7**), com grande concentração no município de Manaus e adjacências, reduzindo o índice pluviométrico nas proximidades do município de Itacoatiara. Espacializar e entender essa dinâmica colabora com as análises acerca da vulnerabilidade, uma vez que a erosividade, tem ligação direta com o início do processo erosivo.

Figura 6 - Mapa de precipitação da rodovia AM – 010/AM.

Índice Pluviométrico da Rodovia AM-010



Org.: Anne Dirane, 2024.

Figura 7 - Precipitação na rodovia AM-010.



Fonte: Anne Dirane, 2025

2.6. Vegetação

A AM 010 é caracterizada por formações florestais definidas (**figura 08**), que de acordo com a EMBRAPA (1988) são Floresta Ombrófila Densa, Floresta Ombrófila Aberta, área de formação pioneira, área de tensão ecológica e vegetação lenhosa.

Segundo Veloso *et al.* (1991), a Floresta Ombrófila Densa é caracterizada por fanerófitos, justamente pelas subformas de vida macro e mesofanerófitos, além de lianas lenhosas e epífitas em abundância, que o diferenciam das outras classes de formações. Porém, a característica ecológica principal reside nos ambientes ombrófilos que marcam muito bem a "região florística florestal".

Assim, a característica ombrotérmica da Floresta Ombrófila Densa está presa a fatores climáticos tropicais de elevadas temperaturas (médias de 25°) e de alta precipitação, bem distribuídas durante o ano (de 0 a 60 dias secos), o que determina uma situação bioecológica praticamente sem período biologicamente seco. Além disso, dominam nos ambientes destas florestas, latossolos distróficos e, excepcionalmente, eutróficos, originados de vários tipos de rochas (AMAZONAS/ZEE, 2010).

Figura 8 - Vegetação na rodovia AM-010.

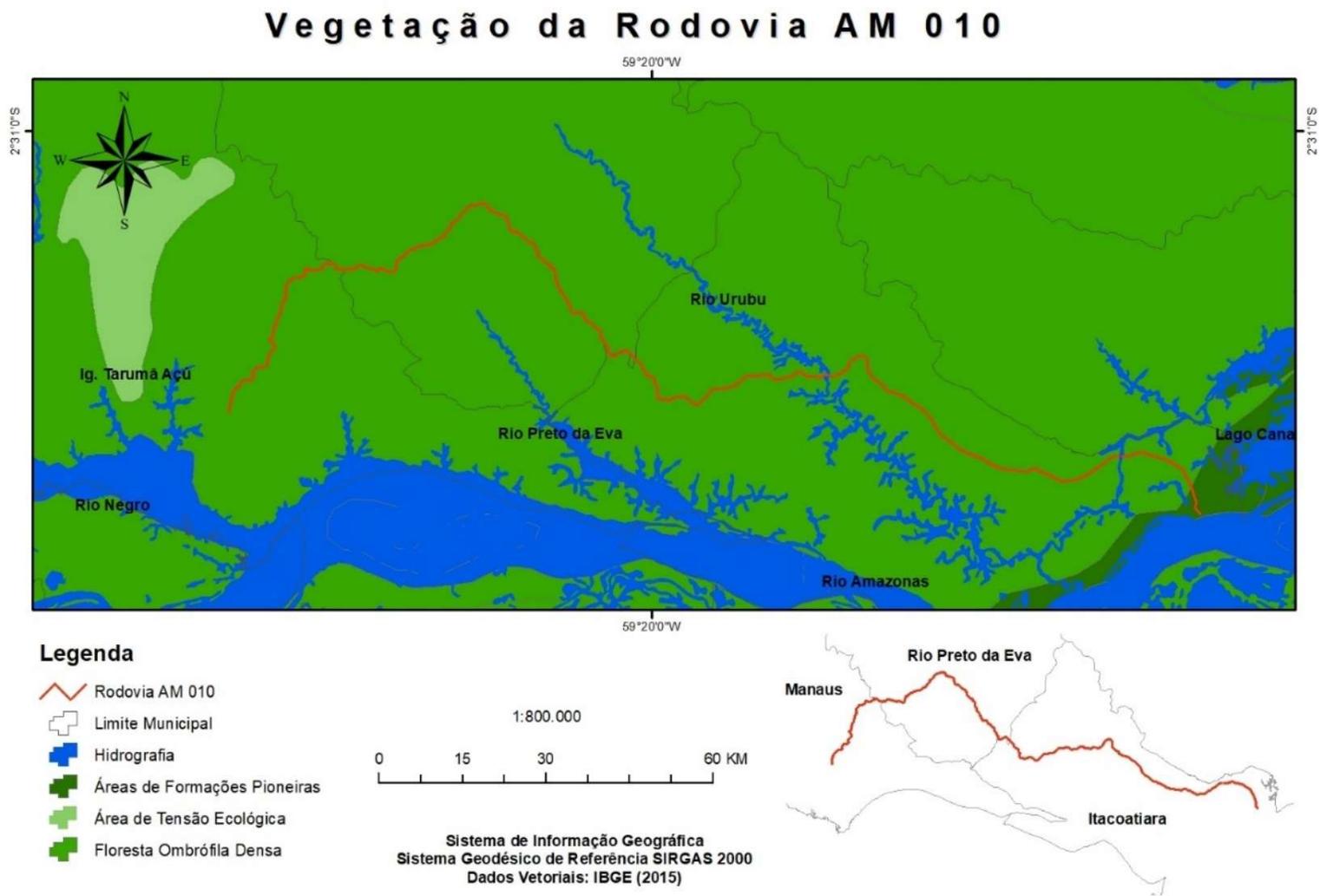


Fonte: Fábio Vieira, 2025.

Florestas Ombrófilas Aberta (**figura 9**), que durante muito tempo foi considerada um tipo de transição entre a floresta amazônica e as áreas extra-amazônicas, foi denominado pelo Projeto RADAMBRASIL de Floresta Ombrófila Aberta. Esta floresta apresenta quatro faciações florísticas que alteram a fisionomia ecológica da Floresta Ombrófila Densa (com palmeiras, cipós, com sororoca e com bambu, além dos gradientes climáticos com mais de 60 dias secos por ano, assinalados na curva ombrotérmica) (IBGE, 2012).

Formações Pioneiras caracterizam-se pela vegetação de primeira ocupação, associada a espécies pioneiras que se desenvolvem sobre áreas pedologicamente instáveis. (IBGE, 2012)

Figura 9 - Cobertura Vegetal da AM-010.



Fonte: IBGE (2014), CPRM (2006). Org. Anne C. M. Dirane, 2025.

2.7. Hidrografia

A rodovia AM 010 está inserida na Bacia Hidrográfica Amazônica, a maior bacia do mundo, drenando uma área superior a 6.000.000 km². (ANEEL, 1997).

O Amazonas, que recebe várias denominações desde suas nascentes, na Cordilheira dos Andes (5.000 m de altitude, no Peru), até adentrar ao Brasil, no município de Tabatinga (AM), quando passa a ser denominado rio Solimões, até o município de Manaus, local onde, ao se unir ao rio Negro, forma o rio Amazonas, que desemboca no oceano Atlântico, no estado do Pará. (CPRM, 2010).

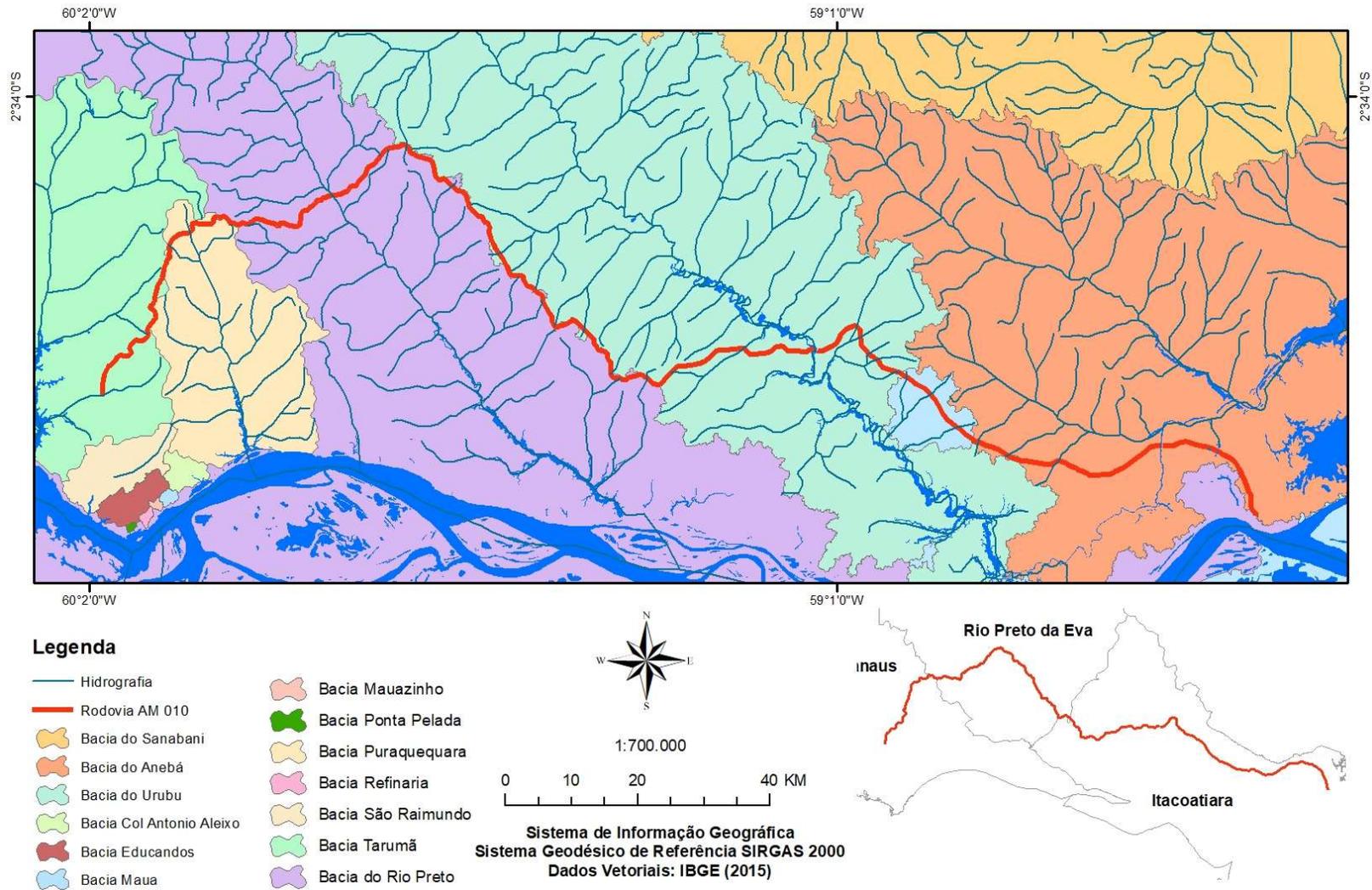
De acordo com a Agência Nacional de Águas (ANA, 2009), a contribuição média da bacia hidrográfica do rio Amazonas, em território brasileiro, é da ordem de 133.000 m³/s. De acordo dos critérios hidrológicos, segundo Molinier *et al.* (1994), a bacia do rio Solimões representa 36% da área total da Bacia Amazônica continental, seguida pelas bacias dos rios Madeira, com 23% e do rio Negro, com 11% da superfície total.

A bacia Hidrográfica Amazônica (**figura 10**) comporta o rio Negro que tem sua foz margeada pelos Municípios de Manaus, à esquerda e o município de Iranduba, à direita (Silva, 2020). As planícies de inundação ao longo do rio Negro não apresentam grandes extensões, se comparadas ao Solimões-Amazonas, visto que o rio é confinado em um leito de substrato rochosos do Escudo Cristalinos das Guianas (Franzinelli; Igreja, 2002).

Do município de Manaus até Itacoatiara, encontra-se a confluência de dois grandes sistemas fluviais, o Rio Negro e o Solimões (Amazonas). A área é marcada por relevo de colinas pequenas e médias, bem dissecadas, que não ultrapassam 85 m de altitude e bacias hidrográficas assimétricas que fluem tanto para o rio Negro quanto para o rio Solimões. (Nascimento *et. al.*, 2011)

Figura 10 - Hidrografia da rodovia AM-010.

Hidrografia da Rodovia AM 010



Fonte: IBGE (2014), CPRM (2006). Org. Anne C. M. Dirane, 2022

De acordo com RADAMBRASIL (1978), a rede hidrográfica que abrange o Rio Negro, apresenta padrões de drenagem dendrítica a subdendrítica, sendo que a densidade de drenagem se caracteriza por ser elevada. Diferente do rio Amazonas, que apresenta padrão de drenagem meandrante, com lagoas marginais e campos de inundação alimentados pelo extravasamento dos rios no período das cheias. (Carvalho; Cunha, 1998) Pela mesma razão, o escoamento das águas fluviais e a propagação das cheias ocorrem lentamente (CPRM, 2010).

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. Vulnerabilidade e Voçorocamento

Este trabalho busca abordar a formação do processo erosivo sob o viés da vulnerabilidade, uma vez que, para a ciência geográfica, este termo tem como objetivo estudar os aspectos sociais e naturais da realidade espacial. Com a difusão do termo, ele passou a descrever situações de fragilidade ou suscetibilidade em diversos contextos: natural, social e ambiental. Para esta pesquisa, foi considerada a vulnerabilidade ambiental.

É a partir das ciências sociais que as investigações acerca da vulnerabilidade fincam suas raízes, possuindo uma história extensa nos escritos sobre riscos, perigos e geografia (Kasperson et al., 2003), com seu significado voltado para a perda (Mitchell *et al.*, 1989). Frequentemente, a vulnerabilidade é entendida como possuindo dois lados: um lado externo, que diz respeito a choques e perturbações aos quais um sistema é exposto, e um lado interno, que representa a capacidade ou a falta de capacidade de responder adequadamente e se recuperar de eventos externos. (Luers et al., 2003). Assim, a vulnerabilidade é definida em sua caracterização como sendo condicionada pelos fatores ambientais e socioeconômicos. (Silva et al., 2012).

A ideia de vulnerabilidade está associada ao ponto mais fraco, mais exposto aos ataques, e sempre relacionada à fragilidade de um ambiente. De acordo com Almeida e Guerra (2010), a degradação do solo e a erosão são causadas pela interação entre o uso da terra, a vegetação e as ações erosivas.

Nesse sentido, tais parâmetros são admitidos, mas ainda não são considerados elementos sociais pertinentes à problemática (Silva, 2012), sendo necessário que

condicionantes, como os aspectos físicos e humanos, sejam analisados para o mapeamento da vulnerabilidade.

Nesta conjuntura, conforme Esteves (2011), o conceito de vulnerabilidade está diretamente relacionado às motivações que podem ou não aumentar os riscos. Essas situações podem agravar um possível risco pré-existente em um determinado local, vinculado à presença do grupo que ali se encontra.

Assim, a vulnerabilidade envolve um conjunto de fatores que podem diminuir ou aumentar o(s) risco(s) a que o ser humano, individualmente ou em grupo, está exposto nas diversas situações de sua vida. Exemplos dessas situações incluem, mas não se limitam a: uma enchente, um deslizamento, a perda de um emprego, uma despesa inesperada, uma doença, a marginalização social, uma recessão econômica, entre outras. (Esteves, 2011). Nesta concepção, a vulnerabilidade é entendida como uma agravante de um possível risco já existente em um determinado local, relacionado à presença da sociedade.

Dessa maneira, faz-se necessário o mapeamento da vulnerabilidade ambiental, visto que este procedimento está ligado à espacialização diferencial das classes sociais na cidade, peculiar a cada momento de sua história social e política.

De forma geral, a caracterização da vulnerabilidade ambiental pode ser analisada a partir de um significado amplo e cumpre um papel importante em elucidar várias questões relacionadas ao entendimento da dinâmica proposta neste trabalho. De acordo com Almeida (2010), ocorrem confusões e contradições no estabelecimento de uma explicação consensual acerca da vulnerabilidade, implicando em obstáculos na operacionalização do conceito. Baseado em Cutter (1996), admite-se que a ausência de concordância decorre de dois fatores: a dificuldade em apreender a multidimensionalidade da realidade analisada, que perpassa as dimensões cultural, social, econômica, ecológica, tecnológica, ambiental, entre outras, e a diversidade de orientações epistemológicas, como análise espacial, ciências físicas, ecologia política e humana e, conseqüentemente, das práticas metodológicas.

Para Leff (2010), a sociedade como um todo enfrenta uma crise ambiental, não proveniente de causas naturais, mas de ordem tecnológica, ética, política, econômica e até social. Portanto, é necessário conhecer e compreender a relação entre aspectos naturais e humanos, considerando as diversas interações entre eles, não apenas de forma linear, mas através de uma análise que englobe todos esses fatores (Frota Filho, 2016). Nota-se a urgência de uma abordagem mais aprofundada em relação às questões ambientais,

considerando fatores naturais e sociais, para a compreensão da relação entre homem e natureza e suas consequências.

A ciência geográfica tem um papel fundamental nessas análises. Segundo Veyret (2007), essa ciência, em seu estudo, considera a análise do meio, também conhecido como ambiente, levando em conta fatores naturais, como relevo, clima, solo, vegetação e hidrografia, e, juntamente com os fatores humanos, realiza elucidações sobre o espaço.

A vulnerabilidade se refere à possibilidade de sofrer danos, contudo o seu uso no meio científico tem suas ascendências na Geografia, mais especificamente em pesquisas sobre desastres naturais (Fussel, 2007) sendo, portanto, um termo usado em uma diversidade de pesquisas relacionadas à ecologia, saúde pública, pobreza, desenvolvimento, sustentabilidade, impactos ambientais e mudanças climáticas globais. (Fussel, 2007; Veyret,2007).

Timmermann (1981) e Fussel (2007) indicam que vulnerabilidade é um conceito de utilização tão ampla que é dispensável realizar uma descrição minuciosa, exceto como um indicador retórico para áreas de grande preocupação. Diante do exposto, a Organização das Nações Unidas (2004) desenvolveu o conceito no que tangem à vulnerabilidade, como: as condições determinadas por fatores ou processos físicos, sociais, econômicos e ambientais que aumentam a suscetibilidade a perda ou dano que uma comunidade pode sofrer (Frota Filho, 2016). O **quadro 01** aborda diversos conceitos sobre vulnerabilidade.

Para Villa e McLeod (2002), a vulnerabilidade está relacionada a processos específicos que se realizam em um sistema, resultante do seu nível de conservação e resistência ou capacidade de restabelecimento após um dano, e a processos superficiais associados à exposição a influências ambientais recentes e futuras.

Quadro 1 - Definição de vulnerabilidade por diversos autores.

Timmerman (1981)	Vulnerabilidade é o grau em que o sistema age adversamente em virtude da ocorrência de um evento perigoso.
Dow (1992)	São as diferentes capacidades de grupos e indivíduos para lidar com perigos naturais, com base em suas posições dentro da sociedade e no espaço.
Alexander (1993)	Vulnerabilidade humana são os custos e benefícios de habitar áreas de risco ao um desastre natural.

Cutter (1993)	Probabilidade de um grupo ou um indivíduo de estar exposto a um efeito adverso provocado por um perigo natural.
Warmington (1995)	Uma condição que, adversamente, afeta a habilidade das pessoas de se preparar para enfrentar ou responder a um perigo.
Lewis (1999)	É o produto de um conjunto de condições prevaletentes no qual os desastres podem ocorrer.
Comfort et al. (1999)	São as circunstâncias que colocam as pessoas em risco enquanto reduzem sua capacidade de resposta ou negam-lhe a proteção.
Sarewitz e Pielke 2000	Refere-se à susceptibilidade de mudança de um sistema perante a ocorrência de um evento extremo.
UNDP (2004)	Uma condição ou processo resultante de fatores físicos, sociais, econômicos e ambientais, os quais determinam a probabilidade e escala dos danos causados pelo impacto de um determinado perigo.
NOAA (2009)	O nível de exposição da vida, propriedade, e recursos ao impacto de um perigo natural.

Fonte: Goerl *et al*, 2011 apud Timmerman (1981); Dow (1992); Alexander (1993); Cutter (1993); Warmington (1995); Lewis (1999); Comfort *et al.* (1999); Sarewitz e Pielke 2000; UNDP (2004) e NOAA (2009).

Nota-se que o termo vulnerabilidade alude a problemas ambientais, como por exemplo, a erosão. De acordo com Gallopin (2006), é importante definir quais impactos serão objeto do estudo, considerando que um sistema pode se mostrar vulnerável a determinados problemas e a outros ser indiferente.

Adger (2006), junta as definições de vulnerabilidade, aos seguintes elementos: exposição, sensibilidade e capacidade adaptativa ou de resposta do sistema. A compreensão desses elementos permite o parecer de maior ou menor vulnerabilidade de um sistema em relação as questões ambientais. (Milanezi, 2016).

Li *et al.* (2006) associaram a vulnerabilidade a características do meio físico e biótico, como declividade, altitude, temperatura, aridez, vegetação e solo. Além disso, relacionaram essa vulnerabilidade à exposição a fontes de pressão ambiental, como a densidade populacional e o uso da terra, bem como à ocorrência de impactos ambientais, como a erosão hídrica (EMBRAPA, 2010). Por sua vez, Lima et al. (2000) afirmam que a vulnerabilidade de um geossistema é avaliada por meio da análise das características dos meios físico (solo, rocha, relevo, clima e recursos hídricos), biótico (tipo de

vegetação) e antrópico (uso e ocupação do solo). Esses fatores determinam se o relevo é mais ou menos instável, ou se está sujeito a processos erosivos.

A vulnerabilidade é o potencial para perda e inclui elementos de exposição ao risco (as circunstâncias que colocam as pessoas e as localidades em risco perante um determinado perigo), e elementos de propensão (as circunstâncias que aumentam ou reduzem a capacidade da população, da infraestrutura ou dos sistemas físicos para responder a e recuperar de ameaças ambientais) (Cutter, 2011). Apesar dos conceitos serem considerados bem debatidos na literatura, estas definições tão simples e genéricas assimilam a essência da vulnerabilidade (Cutter, 1996; Birkmann, 2006).

Para Adger (2006), a vulnerabilidade é entendida como a exposição ou sensibilidade às perturbações ou tensões externas, e a capacidade de se adaptar quando há exposição à natureza ou ainda, o grau que um sistema experimenta as tensões por ter sido modificado ou sofreu perturbações, sejam de ordem ambiental ou sócio-política (Frota Filho, 2016).

De acordo com Cutter (1996) o termo vulnerabilidade exhibe várias dimensões, considerando seu desenvolvimento conceitual no desenvolver de vários ramos da ciência, que utilizam o conceito, resultando em diferentes abordagens teórico-metodológicas.

Os fatores socioeconômicos contribuem para o desenvolvimento de eventos extremos, como as enchentes, voçorocas e movimentos de massa (Wei *et al.*, 2004) e é nesse sentido que o termo vulnerabilidade passa a ser vinculado aos problemas ambientais. A utilização de uma abordagem integradora se faz necessário, uma vez que entenda e explique as difíceis interações entre os processos sociais, naturais e artificiais. Vale ressaltar que para Cutter:

Embora seja importante entender os sistemas e os processos naturais que dão origem aos riscos, não é possível compreender completamente o impacto de tais processos ou acontecimentos naturais, a menos que se examine a forma como esses sistemas interagem com a sociedade. (CUTTER 2011, p. 60)

As indagações acerca da temática vulnerabilidade ainda são bem complexas, pois a mesma pondera muitos fatores e procedimentos, pois o próprio termo vulnerabilidade conecta-se com diversas áreas da ciência (Frota Filho, 2016). A vulnerabilidade versa sobre a possibilidade de um determinado ambiente passar por um impacto, seja ele grande e irreversível, em um ambiente natural ou não.

Quando se discute vulnerabilidade, há uma divisão em vários fragmentos, dando ênfase a vulnerabilidade natural, que aborda aspectos físicos, analisando o ambiente e não

a sociedade, a vulnerabilidade social, que abrange as ações humanas e socioeconômicas e pôr fim a vulnerabilidade ambiental, que integra as questões físico-naturais.

3.2. Vulnerabilidade Ambiental

A vulnerabilidade ambiental é a menor ou maior fragilidade erosiva de um ambiente provocado pelo impacto das atividades humanas, como por exemplo, a expansão urbana. Para Klais *et al.* (2012) a vulnerabilidade natural está relacionada à predisposição do ambiente de reagir a fatores naturais relacionados à morfogênese e à pedogênese, enquanto a vulnerabilidade ambiental é intensificada pela pressão antrópica. Compartilhando da mesma ideia, Santos (2014) reconhece que as pesquisas que rodeiam a vulnerabilidade natural e ambiental, necessitam que sejam analisadas de forma integrada, tanto os fatores do meio físico a fim de determinar a vulnerabilidade natural, quanto dos elementos naturais ligados as ações humanas para a identificação da vulnerabilidade ambiental.

Para Ross (1994) as unidades de fragilidade dos ambientes naturais devem ser resultantes dos levantamentos básicos de geomorfologia, solos, cobertura vegetal/uso da terra e clima. Esses elementos tratados de forma integrada possibilitam obter um diagnóstico das diferentes categorias hierárquicas da fragilidade dos ambientes naturais. (Pinese Junior; Rodrigues, 2012).

Para Lima e Amaral (2013), a vulnerabilidade biofísica permitiu em estudos seguintes, a análise da vulnerabilidade do ponto de vista ao risco ou perigo. Tais condições que anteriormente existentes nos locais. Nesse sentido, seria incluída a vulnerabilidade natural pois as condições físicas e biológicas pré-existent em uma área que a predispõe a um determinado risco. A vulnerabilidade dos locais seriam o produto da vulnerabilidade enquanto exposição ao risco (biofísico ou tecnológico) e da vulnerabilidade enquanto significado social. Nessa última seria incorporada a vulnerabilidade social (já discutida anteriormente) (Cutter, 1996; Lima; Amaral, 2013).

Nessa conjuntura, a Vulnerabilidade como condição pré-existente examina a origem (ou o potencial de exposição ou risco) dos perigos tecnológicos ou biofísicos, detendo-se na distribuição de algumas situações de perigo, na ocupação humana de zonas perigosas (zonas costeiras, zonas sísmicas) e no grau de perda associado com a ocorrência de um evento particular (enchentes, furacões, terremotos).

A Vulnerabilidade como resposta social enfatiza os estudos sobre respostas da problemática inserindo a resistência social aos perigos. Nesta classe a natureza das condições e eventos perigosos destaca-se numa visão mais minuciosa, tomada como um ponto de construção social sem uma condição biofísica. A Vulnerabilidade do perigo dos lugares avalia e combina os dois elementos citados acima, mas é mais enfatiza em aspectos geográficos (Lima; Amaral, 2013).

Nesse sentido, a vulnerabilidade ambiental pode ser percebida como a possibilidade ou impossibilidade do meio natural resistir ou recuperar-se, depois de sofrer impactos decorrentes de atividades humanas, consideradas normais ou incomuns.

Observe-se que o conceito de vulnerabilidade está relacionado a questões específicas, desafios ou impactos ambientais, como as mudanças climáticas e a erosão, entre outros. Conforme destacado por Gallopin (2006), é fundamental delimitar quais perturbações serão objeto de estudo, visto que um sistema pode ser vulnerável ou não.

Na estrutura teórico-metodológico, geralmente, os estudos que envolvem vulnerabilidade estão ligados a dois pontos de vista distintos: a visão de quem é afetado (demografia) e a região ou ambiente vulnerável (geografia) (Souza *et al.* 2015). De acordo com Tagliani (2003), a vulnerabilidade ambiental significa a maior ou menor susceptibilidade de um ambiente a um impacto potencial provocado por um uso antrópico qualquer.

Para Fushimi (2012), a vulnerabilidade ambiental define o significado diverso dos conceitos de susceptibilidade, fragilidade e sensibilidade. Fushimi (2012) diferencia vulnerabilidade ambiental de natural. Assevera que a vulnerabilidade natural abarca os aspectos naturais da paisagem enquanto a vulnerabilidade ambiental abrange tais variáveis e insere a ação da sociedade.

O grupo das condições e índice de informações geológicas como sedimentos, depósitos, formações geomorfológicas como tabuleiros, dunas, áreas de inundação sazonal, planícies; pedológicas gleissolos, neossolos, planossolos; e cobertura vegetal, mangues, vegetação ribeirinha, sem vegetação, são variáveis que mensuram a vulnerabilidade natural, e, acopladas com informações antrópicas (uso e ocupação do solo, infraestrutura precária) e identificam a vulnerabilidade ambiental de uma determinada área (Olimpio, 2011; Fushimi, 2012).

Fushimi destaca que:

os aspectos geomorfológicos, pedológicos, demográficos, de uso da terra e cobertura vegetal foram inter-relacionados, espacializados em mapas temáticos e correlacionados em ambiente de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), cujo produto final foi o mapa de vulnerabilidade ambiental aos processos erosivos lineares. (Fushimi, 2012, p.16)

Os elementos naturais e humanos, analisados de maneira contínua, mensuram tópicos na elaboração de diagnósticos de diversas categorias hierárquicas dos conceitos intrínsecos das fragilidades dos ambientes naturais (Spörl; Ross, 2004).

Neste sentido, Silva e Costa

[...] as pesquisas ambientais precisam se preocupar não somente no levantamento dos problemas ambientais causados pela sociedade e como recuperá-los e sim no estudo do grau de fragilidade (áreas que apresentam alto grau de vulnerabilidade, ou seja, vulneráveis a impactos antrópicos e ao processo erosivo pluviométrico, determinado por fatores físicos (declividade, tipos de solo) e econômicos (uso e ocupação) dos diversos ambientes às interferências antrópicas. (Silva e Costa 2011, p.152)

No âmbito da vulnerabilidade ambiental, os processos erosivos tem grande relevância, uma vez que os materiais erodidos são transportados e depositados em rios, lagos e reservatórios, causando assoreamento e a poluição desses recursos hídricos (Guerra; Marçal, 2006). O estudo da vulnerabilidade ambiental pauta-se no princípio de que a natureza apresenta funcionalidade intrínseca entre seus componentes físicos e bióticos, como apresentado por Ross (1994), fundamentado no conceito de Unidade Ecodinâmica sugerida por Tricart (1977). Portanto, esse trabalho adota o conceito da vulnerabilidade ambiental, que de acordo com Tagliani (2003), é conceituada como qualquer suscetibilidade de um ambiente a um impacto potencial provocado por um uso antrópico.

Em virtude disso, pode-se afirmar que os estudos sobre vulnerabilidade ambiental têm se tornado um termo recorrente na definição e compreensão dos impactos ambientais provocados tanto por fenômenos naturais quanto por ações antrópicas (Castro, 2021).

4. Processos e Fatores Erosivos

Os conceitos relacionados ao termo erosão foram explorados com base em diferentes autores que discutem o processo erosivo.

De uma forma geral, erosão é um termo que representa um conjunto de ações, incluindo o desprendimento (desagregação), o arraste (transporte) e a deposição das partículas de solo causada por agentes erosivos, tais como o gelo, o vento, a gravidade e

a água (Rubira *et al*, 2016). Em particular, a erosão onde o agente erosivo é a água é chamada de erosão hídrica (Fernandes, 2011).

A erosão é processo natural responsável para a formação e transformação das paisagens ao longo do tempo. Isso ocorre quando agentes como a água, o vento e o gelo desgastam, transportam e depositam partículas do solo e das rochas, esculpindo o relevo terrestre, apesar de ser um processo natural, a erosão pode ser significativamente acelerada pelas atividades humanas (Dirane, 2016).

O desmatamento, por exemplo, remove uma vegetação que protege o solo, tornando-o mais vulnerável à ação da chuva e do vento. Da mesma forma, a agricultura intensiva, quando realizada sem práticas de conservação do solo, pode esgotar seus nutrientes e aumentar a perda de sedimentos. Além disso, a construção de infraestruturas, como estradas e cidades, muitas vezes impermeabiliza o solo e altera os padrões de drenagem,

Os processos erosivos podem ocorrer de diferentes formas, sendo a erosão hídrica uma das mais relevantes. Esse tipo de erosão acontece quando a água da chuva atua na desagregação e transporte das partículas do solo. O processo inicia-se com o impacto das gotas de chuva sobre a superfície, conhecido como salpicamento, que desprende as partículas do solo.

À medida que a água se acumula e o escoamento superficial aumenta, a erosão se intensifica, formando sulcos (pequenos canais no solo). Se o processo continuar sem controle, esses sulcos podem evoluir para ravinas (incisões mais profundas) e, em casos extremos, resultar na formação de voçorocas, que são grandes marcações no solo, capazes de comprometer a estabilidade do solo e causar impactos ambientais e estruturais severos (Guerra, 2006).

A erosão também ocorrer pela ação do vento, sobretudo em áreas secas e áridas, com muita frequência em áreas agrícolas desprotegidas, podendo levar os sedimentos por grandes distancias. A erosão glacial, que molda e desloca sedimentos através de grandes massas de gelo, que quando derretidos liberam sedimentos. Nas zonas costeiras a erosão marinha é bem comum, com o desgaste das falésias em decorrência do movimento de ondas e marés e a erosão química, que se dá pela ação da água com o mineral do solo ou das rochas.

4.1. Fatores Erosivos

O desenvolvimento de feições erosivas está diretamente ligado a variações nas taxas de erosão, que são determinadas por diversos fatores controladores. Esses fatores incluem processos hidrológicos, como a intensidade e a distribuição das chuvas, as propriedades físicas e químicas do solo, a sua suscetibilidade à erosão (erosividade), as características geomorfológicas das encostas, a presença e o tipo de cobertura vegetal (Guerra, 1994), além das intervenções humanas, como desmatamento, uso inadequado do solo e obras de infraestrutura. A interação entre esses elementos define a intensidade e a evolução dos processos erosivos.

Compreender o desenvolvimento contínuo dos processos erosivos é fundamental para entender como essas feições se formam e quais as possíveis consequências. Os fatores controladores da erosão são a erosividade, erodibilidade, cobertura vegetal, as características da encosta e as práticas humanas. De acordo com Guerra (1994), a capacidade da água da chuva ou vento de desagregar e transportar as partículas do solo, sendo importante na influência e intensidade dos danos causados pela erosão. A erosividade em decorrência da água da chuva é determinada por sua intensidade, volume, distribuição ao longo do tempo e duração. A erodibilidade consiste a capacidade do solo em resistir ao desgaste (Guerra et al., 2004). Sobre a cobertura vegetal, Gyssels *et al.* (2005) afirmam que a vegetação desempenha um papel fundamental no controle da erosão, atuando por meio da interceptação das chuvas, graças à densidade de sua copa, raízes e folhas, que modificam a distribuição e o impacto das gotas d'água no solo. O relevo desempenha um papel fundamental na dinâmica da erosão, influenciando a forma como a água escoar e, conseqüentemente, a intensidade e os tipos de processos erosivos que ocorrem em uma determinada área (Rubira *et al.*, 2016). Constata-se, baseada na ciência, que o homem atua como agente modificador do meio físico, acelerando os processos erosivos, estimulando o desequilíbrio do meio e ocasionando problemas socioeconômicos na área afetada da ocorrência dos processos erosivos (Rubira *et al.*, 2016).

A interação entre esses processos ocorre de forma complexa e variavelmente conforme o ambiente, influenciando diretamente a paisagem, a qualidade do solo e a valorização da área.

4.2. Voçoroca

O estudo acerca do processo erosivo, especificamente sobre voçorocas, tem sido cada vez mais frequente na Região Metropolitana de Manaus (Silva, 2014; Abreu, 2016; Dirane, 2016; Silva, 2021).

O tema voçorocas é de grande relevância, pois sua ocorrência e seus processos não apenas desempenham um papel significativo na dinâmica geomorfológica, especialmente em regiões tropicais, mas também geram impactos expressivos no meio natural e na socioeconomia (Coelho Netto, *et al.*, 2023).

De acordo com Vieira (2008) a voçoroca é uma incisão erosiva que apresenta queda em bloco das camadas do solo, paredes verticais e fundo plano, formando secção transversal em U e profundidade superior a 1,5 m (**quadro 2**). Canal de drenagem com paredes abruptas, com fluxos temporários ou eventualmente pequenos, erosão geralmente intensa e cabeceira bastante íngreme e escapada (Bigarella; Mazuchowski, 1985). Oliveira (1999) descreve as ravinas e voçorocas como incisões resultantes de desequilíbrios naturais ou induzidos pela ação antrópica.

Quadro 2 - Conceitos de voçorocas.

1	Soil Science Society of América, 1975	Incisão com profundidade superior a 0,30 m.
2	Bigarella e Mazuchowski, 1985	Canal de drenagem de paredes abruptas com fluxos efêmeros ou eventualmente pequenos.
3	Instituto Paulista de Tecnologia – IPT (São Paulo, 1990).	Incisão erosiva que apresenta como características principais a queda em bloco e afloramento do lençol freático.
4	Guerra, 1994	Possui paredes laterais íngremes, fundo chato, ocorrendo fluxo de água no seu interior durante eventos chuvosos.
5	Canil et al., 1995	Canal profundo com paredes irregulares e perfil transversal em U e resultante da ação combinada entre escoamento superficial e subterrâneo.
6	Vieira, 1998	Incisão erosiva que apresenta queda em bloco das camadas do solo, paredes verticais, fundo plano, secção transversal em U.
7	Oliveira, 1999	Incisão natural resultante de desequilíbrios naturais ou induzidos pela ação antrópica, com profundidade e largura superiores a 0,50 m,

8	Lozet e Mathieu, 2002	Depressão originada pela ação do escoamento concentrado da água e que não pode ser combatida por meio de instrumentos de arado. Pode apresentar profundidade entre 1 e 12 m e a largura pode ultrapassar mais de 30 m.
9	Vieira (2008)	Incisão erosiva que apresenta queda em bloco das camadas do solo, paredes verticais, fundo plano, secção transversal em U e profundidade superior a 1,5 m.

Modificado de Vieira, 2008.

A princípio, as voçorocas foram consideradas como produto da disposição dos sistemas naturais a alcançar um estado de equilíbrio entre energia disponível e a força para dissipar energia (Oliveira, 1999). No entanto, conforme Barcelar (2006) no momento presente, em decorrência das ações antrópicas, como o desmatamento, atividades agrícolas sem práticas de manejo e conservação adequadas, prática agropecuária e obras de engenharia civil, tal sistema tem seu equilíbrio dinâmico alterado de forma acelerada.

Os fatores que contribuem para a ocorrência de voçorocas podem ser classificados em naturais e antrópicos. No primeiro, destacam-se as alterações pluviais (intensidade e frequência), as características do relevo (como forma, declividade e orientação), as propriedades do solo (textura, estrutura, porosidade, permeabilidade, estabilidade de agregados, entre outras) (Vieira, 1978; Guerra, 1995), aspectos geológicos (lineamentos, juntas e fraturas) (Dirane; Vieira, 2014; Zhao et al., 2022). Os que se referem aos fatores antrópicos estão relacionados às alterações no uso e cobertura do solo, como práticas agrícolas ecológicas e impermeabilização do terreno (Marchioro; Ribeiro, 2023).

O voçorocamento (**figura 11**) ocorre quando o solo está sujeito a uma exposição intensa, geralmente causada por um escoamento concentrado de água da chuva em áreas com pouca ou nenhuma vegetação para proteger. É um processo destrutivo que transforma pequenos sulcos e fendas em grandes incisões erosivas, podendo atingir vários metros de profundidade e largura.

Figura 11 - Voçoroca no Km 135, AM-010 (Manaus – Itacoatiara)



Fonte: Anne Dirane, 2015.

Para Guerra (2016) surgimento das voçorocas são atribuídos às taxas de variação de erosão, as quais estão ligadas à ação de fatores controladores, como: processos hidrológicos, propriedades físicas dos solos, a erosividade, as características da encosta, a cobertura vegetal e a intervenção antrópica (Vieira, 2008).

Na perspectiva da influência antrópica, o desmatamento e terraplenagem criam as condições ideais nessas superfícies dissecadas para a deflagração de processos de voçorocamentos, que aliados a sistemas de drenagem pluviais ineficientes tornam mais rápido o surgimento das voçorocas (Carvalho, 2017).

No que se reporta ao solo, quando se encontra sem cobertura vegetal, favorece a formação de crostas², dificultando a infiltração e contribuindo para o escoamento superficial. O início do processo de escoamento superficial, o fluxo se apresenta laminar, em filetes, em lençol ou linear (Mathias et al., 2020). O escoamento linear concentrado tem potencial para originar incisões no terreno, principais causas do voçorocamento.

Tal processo resulta na grande movimentação de sedimentos, que podem ser transportados pela encosta, atingindo áreas mais baixas, como por exemplo as rodovias. Quando a rodovia se encontra na parte mais elevada da vertente, o processo contribui com deslizamento de grandes áreas e até mesmo com a destruição da rodovia.

² A ação direta da chuva na superfície do solo e a deposição de partículas, decorrentes da quebra dos agregados, provocam a modificação da estrutura superficial do solo, levando ao desenvolvimento de crostas (Rosa *et al.*, 2013).

O voçorocamento em rodovias podem atingir grandes proporções e consequências graves, como os danos estruturais por conta dos sedimentos transportados, desabamento de pontes, barreiras de contenção e canaletas. A interrupção do tráfego, que dificulta a mobilidade de transportes e de pessoas, além do custo de manutenção, com reparos frequentes nas rodovias, o risco à segurança e o impacto ambiental, afetando ecossistemas locais, alterando solos e habitats.

4.2. Geoprocessamento e a vulnerabilidade

O geoprocessamento é uma ferramenta essencial no mapeamento da vulnerabilidade, pois permite a coleta, análise e representação espacial de informações geográficas relacionadas a fatores que influenciam a vulnerabilidade de uma área. Combinando dados ambientais em plataformas de análise geoespacial, o geoprocessamento facilita a identificação de áreas vulneráveis a risco, inundações, degradação ambiental e erosões.

O SIG permite a integração de dados espaciais, reunindo uma diversidade de informações gráficas no mesmo ambiente de análise. As imagens de satélite oferecem uma perspectiva privilegiada para explorar e compreender o planeta, permitindo uma visão ampla e multitemporal de grandes áreas, incluindo locais remotos ou de difícil acesso (Florenzano, 2011). Geotecnologias, segundo Guerra (2006), são um conjunto de técnicas e ferramentas, como Sistemas de Informação Geográfica (SIG), Sensoriamento Remoto e Cartografia Digital, que integram coleta, processamento e análise de dados georreferenciados. Essas tecnologias facilitam a compreensão do ambiente por meio da quantificação de características naturais e do processamento de imagens digitais.

5. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O conjunto integrado de fatores ambientais à frente de atividade humanas, que aconteceram ou que irão acontecer, poderá sofrer alterações, prejudicando absolutamente ou relativamente a estabilidade ecológica de determinado local.

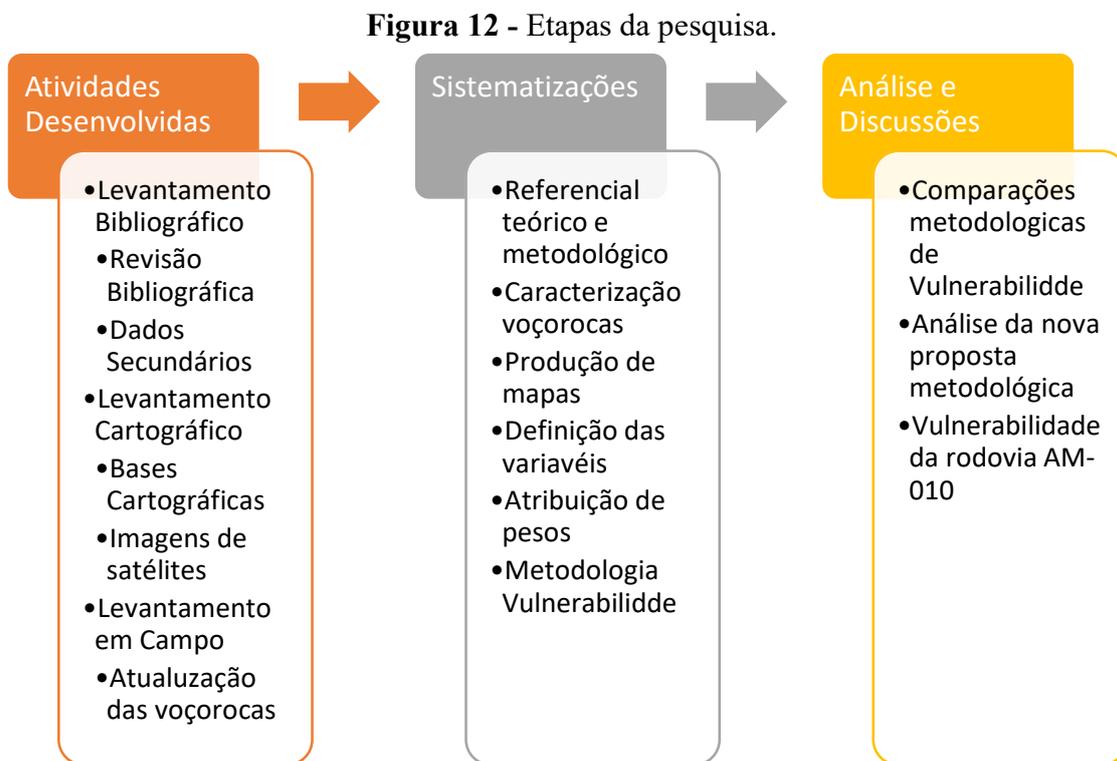
Nesse sentido, a vulnerabilidade ambiental pode ser compreendida a partir da análise das características ecodinâmicas dos sistemas ambientais, comparando com as respostas do meio físico aos resultados de ações antropogênicas (Tagliani, 2002; Santos; Caldeyro, 2007). O estudo da ecodinâmica (Tricart, 1977) nos permite, através da pedogênese e da morfogênese, classificar o grau de estabilidade do meio ambiente, sendo a formação do solo o critério de estabilidade.

Os processos erosivos são acontecimentos exclusivos da superfície e as condicionantes físicas do solo exercem sua função, sendo para facilitar ou dificultar o desenvolvimento da erosão. Muitos fatores podem facilitar a desgaste como a água da chuva e ação dos ventos, assim como alguns fatores podem ajudar na sua prevenção, como a cobertura vegetal, a forma do relevo e a própria resistência do solo (Volk *et al.*, 2004).

A utilização do solo e suas capacidades para a determinação de conflitos de uso tem se mostrado recente e com poucos estudos publicados. Dessa forma, a utilização do solo serve como um bom parâmetro para determinar os problemas em decorrência do seu uso indevido, auxiliando no planejamento ambiental (Poelking, 2007). A partir da determinação das áreas onde existem conflitos ambientais devido as características do solo são possíveis a realização de planejamentos ambientais visando a tomada de decisão sobre as melhores formas de uso para estes ambientes (Hermuche, 2009).

De acordo com Birkmann (2007), ainda não é satisfatório as metodologias desenvolvidas para a identificação e mensuração de riscos e vulnerabilidade. Nesse sentido a utilização do sistema de informações geográficas permite a identificação de pontos que apresentem susceptibilidade a erosão de forma rápida e precisa, a partir da atualização e sobreposição de informações presentes em bancos de dados (Faria *et al.*, 2013). Para a realização do mapa da vulnerabilidade, será necessário realizar o mapeamento dos sistemas ambientais presentes na área de estudo com base na interpretação de produtos de sensoriamento remoto e trabalho de campo, avaliando a vulnerabilidade intrínseca de cada um para em seguida fazer a análise e classificação.

A **figura 12** mostra as etapas do trabalho, operacionais, metodológicas e a sistematização das informações do projeto.



Org: Anne Dirane (2024).

Figura 13 – Equema dos procedimentos metodológicos.

ATIVIDADES DESENVOLVIDAS			
LEVANTAMENTO DE DADOS	Levantamento bibliográfico	Levantamento cartográfico	Levantamento de campo
	Revisão Bibliográfica	Produtos de sensoriamento remoto	Cadastramento das voçorocas e canaletas
SISTEMATIZAÇÃO	Referencial teórico-metodológico	Definição de variáveis e pesos	Elaboração de gráficos e tabelas
		Mapas temáticos	
ANÁLISES E DISCUSSÕES	Discussões e debates	Álgebra de mapas	
Resultados			
Mapa da vulnerabilidade ambiental a processos erosivos da rodovia AM-010			

Org. Anne C. M. Dirane, 2023.

Como já exposto, há necessidade da pesquisa no sentido do mapeamento de áreas vulneráveis, adequação de metodologias e a demanda por minimizar os efeitos da degradação no ambiente, principalmente em áreas mais frágeis e que requerem um olhar mais cuidadoso no âmbito do planejamento.

Considerando o Decreto N°. 9.885/86,

Parágrafo Único – Considera-se como Faixas de Domínio para efeito de reserva de áreas do patrimônio público e processos expropriatórios de porções de glebas particulares as extensões laterais das rodovias estaduais, necessárias à segurança do tráfego e eventuais ampliações e melhoramentos das plataformas e serão contadas a partir dos respectivos eixos de diretrizes para cada lado do leito estradal, a igual distância, na forma seguinte (AMAZONAS, 1986).

- AM-010 – Manaus/Itacoatiara – do Km 0 ao Km 05: 20m, sendo 10m para cada lado, do Km 05 ao Km 18: 40m; do Km 18 ao Km 266: 70m.

Para este escopo, foi delimitado uma faixa de domínio de 70 m (Lei Estadual nº 9885/86) de cada margem da rodovia, considerando a área de contribuição, sobretudo devido ao lançamento dos sistemas de drenagem, decorrentes das obras e engenharias e de águas pluviais.

Se faz necessário a definição de uma faixa de domínio, para estabelecer as ações de controle e mitigação de impactos, assim como a determinação correta de ações que melhor se adequem as especificidades da região.

As rodovias, bem como outros tipos de obras lineares, possuem grande extensão, interceptando diversos tipos de ambientes, ecossistemas e populações (Constanza *et al.*, 1997; Guo *et al.*, 2001). Empreendimento dessa natureza necessitam de maior atenção quanto aos seus impactos decorrentes, já que o alcance do projeto é extenso e abrangente (Coelho *et al.*, 2013).

5.1. Voçorocas rodovia AM-010

Para alcançar os objetivos da pesquisa, adotou-se o método sistêmico, que busca compreender o todo a partir da análise de seus elementos. Esse método considera a interdependência entre os diversos fatores envolvidos, examinando cada variável em sua relação com o conjunto, permitindo uma abordagem mais integrada e abrangente.

Para o mapeamento das feições erosivas do tipo voçoroca, foi necessário a realização do trabalho de campo, para o cadastramento de novas voçorocas e a atualização de dados, uma vez que já foram realizados trabalhos na rodovia AM – 010 (Dirane, 2016).

A ficha cadastral (**anexo**) foi utilizada no mapeamento das incisões erosivas, na área de influência direta ao longo das rodovias AM-010. A área de influência, faixa de domínio, abrange 70 metros da margem esquerda e 70 metros da margem direita, das rodovias.

A classificação dos tipos (**figura 14**) e formas das incisões erosivas é fundamental para determinar o estágio de evolução dessas formações, permitindo estimativas sobre seu possível crescimento. A ação das águas superficiais e subterrâneas desempenha um papel crucial para sua rápida evolução.

Figura 14 - Forma das voçorocas.

 <p>Linear</p>	Conecta-se a existência de um ponto principal, por onde a drenagem se concentra.
 <p>Ramificada</p>	Caracteriza-se pela presença de múltiplos canais de escoamento superficial.
 <p>Irregular</p>	Podendo ter conexão com um ou mais fluxos superficiais concentrados, caracterizando-se inconstante entre as demais formas existentes.
 <p>Bifurcada</p>	Exibe duas áreas de contribuição de fluxos superficiais concentrados.
 <p>Retangular</p>	Há possibilidade de ser, em boa parte dos cenários, a forma final da expansão de uma das outras formas descritas.

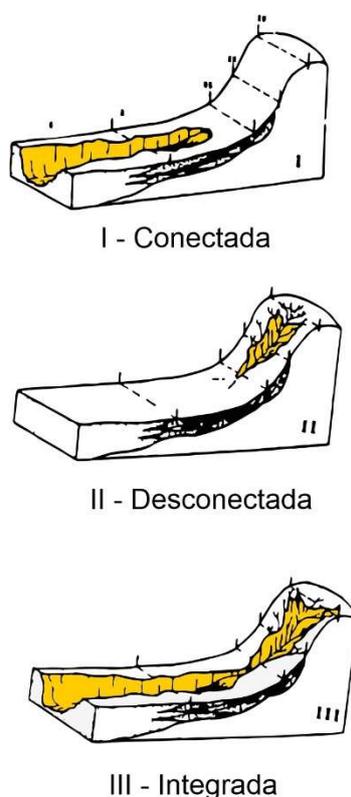
Fonte: Modificado de Vieira, 2008.

As incisões erosivas do tipo voçoroca podem variar em diferentes formas (figura 14), dependendo do padrão de erosão e da relevância da área. Tais formas refletem como a água escoar, desgasta o solo e se aprofunda ao longo do tempo. Entender a forma das voçorocas pode contribuir com a compreensão de seu início.

Conforme Oliveira (1989), as voçorocas podem ser de três tipos (**figura 15**): 1) conectadas - se associam ao escoamento hipodérmico e/ou subterrâneo nas partes baixas

da encosta, podendo ser consideradas canais de primeira ordem; 2) desconectadas - encontrando-se na parte superior da encosta, estão ligadas ao escoamento superficial e/ou a movimentos de massa e não podem ser consideradas canal de primeira ordem por não estarem ligadas a nenhuma rede de drenagem; e, 3) integradas - são na verdade a junção das duas formas anteriores (voçorocas conectadas e voçorocas desconectadas), formando uma só incisão erosiva (VIEIRA, 2008) estas mudam totalmente a forma do relevo.

Figura 15 - Modelo de evolução das voçorocas.



Fonte: Modificado de Oliveira, 1989.

A atualização dos dados das voçorocas realizados em campo possibilitará a previsão do risco das voçorocas em direção a pista, que será baseada na escala de risco erosivo (quadro 3) de Tavares e Vieira (2010).

O **quadro 3** apresenta o intervalo em metros e a quantidade de meses que a voçoroca pode crescer e atingir a pista, definida em quatro níveis, que pode ser do 1, como sendo risco imediato, quando no prazo de até 6 meses pode crescer até 3 metros e atingir a pista.

A previsão de risco erosivo é necessária para análise das voçorocas, indicando a

previsão do risco e prioridade em adotar as medidas de contenção adequadas, evitando danos materiais e a própria vida.

Quadro 3 - Escala de risco erosivo.

ESCALA DE RISCO EROSIVO			
NÍVEL	Intervalo*	Descrição	Meses
1	0 -3	Risco imediato	0 - 6
2	3 -6	Risco a curto prazo	6 - 15
3	6 - 15	Risco a médio prazo	15 - 36
4	>15	Riso a longo prazo	>36

*Intervalo em metros

Fonte: Tavares *et al.* (2010).

Para a classificação do tamanho das incisões erosivas, será adotado o modelo (**quadro 4**) utilizado por Vieira e Albuquerque (2004), onde classificam cinco tamanhos de voçorocas, de acordo com o volume erodido.

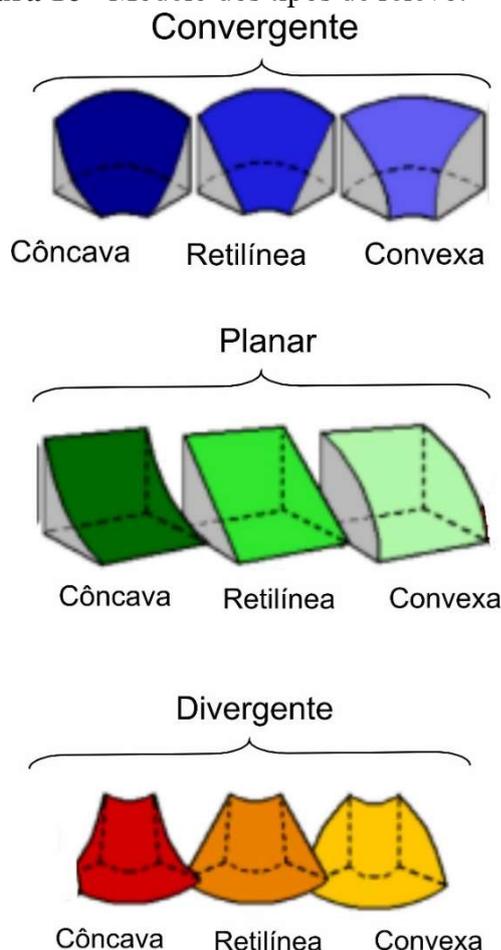
Quadro 4 - Classificação das voçorocas por tamanho.

CLASSIFICAÇÃO DAS VOÇOROCAS POR TAMANHO (M3)		
ORDEM	Volume Erodido	Tamanho
1	Até 999 m3	Muito pequena
2	De 1.000 m3 até 9.999 m3	Pequena
3	Entre 10.000 e 19.999 m3	Média
4	Entre 20.000 e 40.000 m3	Grande
5	Mais de 40.000 m3	Muito grande

Fonte: Vieira; Albuquerque ,2004.

A caracterização da forma das vertentes será composta da verificação dos seguintes aspectos: tipo, declividade, cobertura vegetal, e feições erosivas. Tais observações serão feitas em campo, no cadastramento das incisões. Para o tipo de vertente (**figura 16**), será utilizado o modelo de Valeriano (2008).

Figura 16 - Modelo dos tipos de relevo.



Fonte: Valeriano, 2008 Org: Anne C. M. Dirane, 2023.

5.2. Identificar a origem e condicionantes dos processos que causam a evolução das voçorocas.

Para realização da análise da vulnerabilidade erosiva da área de estudo, foi aplicada uma adaptação da proposta metodológica de mapeamento da vulnerabilidade à perda de solo, baseada na metodologia de Crepani *et al.* (2001). A referida metodologia tem como base o princípio da Ecodinâmica de Tricart (1977). Estes autores consideram os processos dinâmicos dos ambientes, com o balanço entre os processos formadores de solo

(pedogênese) e os processos erosivos (morfogênese). A adaptação da metodologia considerou aspectos mais regionais, como o índice pluviométrico. Estes apresentam critérios onde buscou-se destacar, em cada um dos temas (Geologia, Relevo, Solo, Vegetação e Clima.), parâmetros que se apresentam como indicadores de categoria dos processos morfodinâmicos. Para este trabalho, os critérios utilizados foram (de declividade, intensidade pluviométrica, altimetria, uso e cobertura da terra e solos).

O mapa de vulnerabilidade à erosão foi obtido a partir do cálculo de mapas das grades de vulnerabilidade à erosão (**quadro 5**), para os temas de declividade, intensidade pluviométrica, altimetria, uso e cobertura da terra e solos.

Conforme a equação elaborada para este trabalho

$$V = D + A + U + S + G$$

5

Onde:

V= vulnerabilidade;

D = vulnerabilidade para a Declividade;

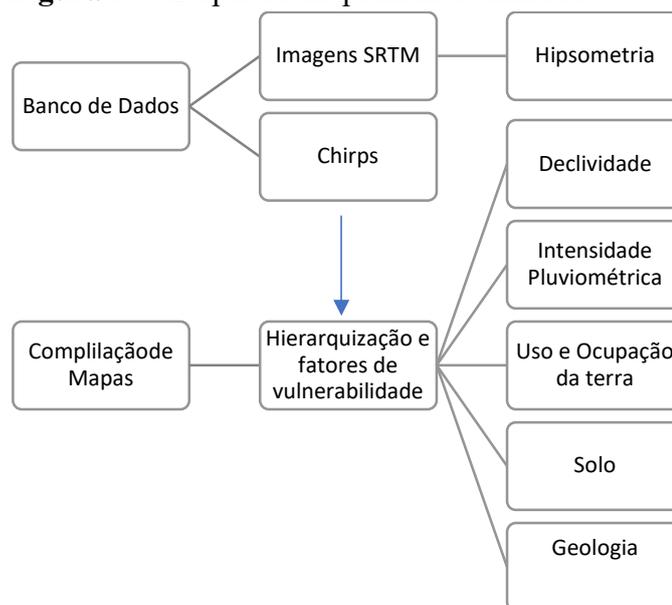
E = vulnerabilidade para a Intensidade Pluviométrica;

S = vulnerabilidade para o Uso e Cobertura da terra;

U = vulnerabilidade para o Solos

G - Geologia

Figura 17 - Etapas do mapeamento temático.



Org.: Anne Dirane, 2024.

Quadro 5 - Distribuição da classe de vulnerabilidade.

Classe da Vulnerabilidade	Intensidade pluviométrica (mm/ano)	Declividade	Uso e ocupação da terra	Solos	Geologia
1	< 1800 - 2230	0 – 08	Formação Florestal	Corpos d'água	Formação Alter do Chão
2	2230 - 2560	08-20	Formação Campestre	Latossolo	Cobertura Dentrito-Laterítica Paleogênica/ Terraços Holocênicos
3	>2800	>45	Área Urbana	Neossolo/ Gleissolo /Plintossolo	Aluviões Holocênicos

Org. Anne Dirane, 2024.

5.2.1. Declividade

O relevo é um fator natural que determina a velocidade dos processos erosivos, podendo ocorrer com maior velocidade em relevo mais inclinados, pois a declividade aumenta a velocidade

de escoamento, intensificando a capacidade erosiva. Quanto maior o trecho percorrido na encosta, mais importância a declividade assume. Para determinar a influência da declividade, é necessário que ela seja analisada em conjunto com outros fatores.

A declividade é efetiva na análise da vulnerabilidade erosiva, mostrando as inclinações do terreno, sendo um dos principais fatores influenciadores do escoamento superficial da água. Terrenos com maior declividade tendem a acelerar o fluxo de água, aumentando o potencial de erosão, pois a água tem mais energia para desagregar e transportar partículas do solo. Desta forma, a declividade permite identificar áreas de risco, orientando estratégias de manejo e controle da erosão ao indicar as regiões onde as intervenções são mais permitidas.

Loch (2008) salienta a importância dos mapas geomorfológicos para o planejamento do uso do solo, uma vez que as condições do relevo orientam a estrutura urbana, a rede viária e o uso da terra no meio rural.

5.2.2. Erosividade

A intensidade pluviométrica é responsável pela erosividade da chuva, pois transforma a energia potencial em energia cinética, em qual desagrega as partículas do solo (Crepani *et al*, 2001). No Brasil, a erosão causada pela água da chuva é a forma mais significativa de degradação do solo, com perdas que variam de 0,1 t ha⁻¹ até 136,0 t ha⁻¹ conforme o uso e cobertura do solo (Anache *et al.*, 2017).

Silva *et al.* (2020) destacam que, a chuva é considerada como o principal tipo de precipitação, sendo uma das variáveis climatológicas fundamentais na determinação das condições do tempo e do clima em escala local. Crepani *et al.* (2004) estabelecem a fórmula da intensidade pluviométrica para análise da vulnerabilidade a perda de solos. Para esse trabalho, as informações pluviométricas foram obtidas a partir do satélite CHIRPS.

Medir a precipitação em um determinado local, utilizando instrumentos de superfície (pluviômetro ou pluviógrafo), é relativamente simples (Contudo, apesar de fornecerem excelentes estimativas quando bem manejados, esses instrumentos apresentam limitações na quantidade e no arranjo da distribuição espacial (Rincón-Avalos *et al.*,2022).

O CHIRPS é uma ferramenta de sensoriamento remoto e programação, utilizado para correlação entre dados e geração de mapas. O Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Stations (CHIRPS) combina informações de satélite com campos de precipitação e estações meteorológicas. Sua utilização se mostrou muito eficaz em espacializar dados pluviométricos em regiões onde há deficiência de estações

pluviométricas. O CHIRPS se destaca como baixa latência, registros longos e melhor resolução espacial (Funk *et al.*, 2015; Costa *et al.*, 2019; López-Bermeo *et al.*, 2022; Rincón-Avalos *et al.*, 2022; Santos *et al.*, 2023).

O CHIRPS possui uma resolução espacial de 0,05°, ou aproximadamente 5 km, próximo ao equador, cobertura geográfica de 50°S a 50°N, com dados de 1981 até os dias atuais e é disponibilizado em conjuntos de dados diários, em pântadas e dados mensais. Os dados do CHIRPS foram utilizados neste trabalho para subsidiar e analisar a distribuição espacial da precipitação ao longo da rodovia AM – 010, no Estado do Amazonas. Foi validado e comparado com os dados disponibilizados pelas estações meteorológicas do INMET.

Segundo Crepani *et al.* (2008), as principais características da chuva envolvida nos processos erosivos são: pluviosidade, intensidade pluviométrica e distribuição sazonal da precipitação. A metodologia proposta para esta tese consiste na coleta da pluviosidade, subsidiando o mapa de chuvas da AM-010, para ser analisado com outros dados.

5.2.3. Uso e cobertura da terra

O uso e cobertura da terra é o cruzamento mais importante entre as atividades humanas e o meio (Casimiro, 2000), a ocupação inadequada do solo ao longo de rodovias, podem ocasionar diversos problemas, entre eles: surgimento de feições erosivas e assoreamento dos canais. A impermeabilização do solo através da expansão urbana pode afetar a percolação das águas pluviais e o regime hídrico (Carvalho *et al.*, 2000).

Atualmente, diversas ferramentas de geotecnologia podem ser acessadas por softwares livres ou plataformas online, disponíveis em sites e aplicativos. Um dos principais projetos nacionais voltados para a classificação de cobertura terrestre é o Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo no Brasil (MapBiomias, 2017a). No contexto desse projeto, o MapBiomias desenvolveu um sistema de validação e refinamento de alertas para monitorar o desmatamento, a manipulação e a regeneração da vegetação nativa, utilizando imagens de alta resolução (MAPBIOMAS, 2019).

Um meio de espacializar e quantificar o uso da terra é por meio da coleta, manipulação e visualização dos dados (Volpe, 2009). Os métodos de informações digitais, desenvolvidos nos últimos anos, ganham cada vez mais espaço e se mostram eficientes na organização e representação dos dados.

As imagens utilizadas pelo projeto são das séries históricas produzidas pelos satélites LANDSAT (com 30 metros de resolução espacial). Todas as imagens disponíveis no ano são usadas para geração de mosaicos, com as bandas de reflectância, índices espectrais, temporais e de textura. Todo o processamento é feito na nuvem e as classificações supervisionadas são feitas por algoritmos de aprendizagem de máquina na plataforma Google Earth Engine (Gorelick, 2016).

Para o mapeamento do uso e cobertura da terra, será usada a delimitação da área de influência direta, 2,50 Km de cada margem da rodovia, sendo necessário imagens de Satélite Landsat 8, obtidas pelo MapBiomias.

O Mapbiomas© utiliza as imagens LANDSAT de observação da terra com satélite, sendo processadas em pixels, que são as unidades de trabalho da ferramenta, disponíveis gratuitamente na plataforma Google Earth Engine. Os dados apresentados pela plataforma de monitoramento ajudam a compreender a evolução da ocupação do território e os impactos sobre os biomas no Brasil para uma série histórica de mais de 30 anos de dados de mapeamento do uso e cobertura da terra para todos os biomas brasileiros (MAPBIOMAS, 2021).

Florenzano (2011) afirma que a interpretação, tratamento e classificação de imagens de satélite se mostram eficientes no mapeamento do uso e da cobertura da terra, sendo adequadas para alcançar a distinção entre diferentes tipos de uso e de cobertura vegetal.

Após obtenção das imagens LANDSAT 8 OLI/TIR 8, será aplicada a técnica de composição colorida RGB no software ArcGis 10.1, após esse procedimento, será realizado o recorte da área de estudo.

Segundo o Manual Técnico de Uso da Terra (IBGE, 2013) a maioria das atividades humanas como agricultura, indústria, urbanização, são identificadas de acordo com as características presentes na superfície terrestre. Essas características são expressas em diferentes tipos de textura, rugosidade, formato, tonalidades presentes na imagem do sensoriamento remoto.

Para o mapeamento do uso e cobertura da terra, obedecerá a classe do MapBiomias (**quadro 6**) (2023) que classifica a cobertura do solo como:

Quadro 6 - Classificação de uso e cobertura da terra.

Nível	Descrição
Formação Florestal	Floresta Ombrófila Densa, Floresta Estacional Sempre-Verde, Floresta Ombrófila Aberta, Floresta Estacional Semidecidual, Floresta Estacional Decidual, Savana Arborizada, Áreas que sofreram ação do fogo ou exploração madeireira, Floresta resultante de processos naturais de sucessão, após supressão total ou parcial de vegetação primária por ações antrópicas ou causas naturais, podendo ocorrer árvores remanescentes de vegetação primária.
Formação Campestre	Savana, Savana Parque (Marajó), Savana-Estépica (Roraima), Savana Gramíneo-Lenhosa, Campinarana, para regiões fora do Ecótono Amazônia/Cerrado. E para regiões dentro do Ecótono Amazônia/Cerrado predominância de estrato herbáceo.
Área Urbanizada	Áreas com significativa densidade de edificações e vias, incluindo áreas livres de construções e infraestrutura.
Corpos D'água	Rios, lagos, represas, reservatórios e outros corpos d'água.
Não Observado	Áreas bloqueadas por nuvens ou ruído atmosférico, ou com ausência de observação.

Fonte: MapBiomias (2023). Org. Anne C. M. Dirane (2023).

5.2.4. Solos

O grau de desenvolvimento do solo é o parâmetro para estabelecer a vulnerabilidade (quadro 6) do mesmo (Crepani *et al*, 1996). Rodrigues *et al*. (2017) afirmam, que um ambiente natural estável que favorece o processo de pedogênese, apresenta consequentemente solos mais desenvolvidos e intemperizados, enquanto que em um ambiente instável prevalece a denudação do relevo, tendo o predomínio de processos erosivos, portanto solos mais novos e inconsistentes. Dessa forma, utilizou-se como base para atribuir valores aos solos predominantes na bacia, os valores de vulnerabilidade/estabilidade dos solos, adaptado por Ribeiro e Campos (2007), conforme indica a **Quadro 7**.

Quadro 7 – Classes de solos

Ordem	Descrição
Gleissolos	Gleissolos são solos constituídos por material mineral com horizonte glei iniciando-se dentro dos primeiros 50 cm a partir da superfície do solo, ou a profundidade maior que 50 cm e menor ou igual a 150 cm desde que imediatamente abaixo de horizonte A ou E ou de horizonte hístico com espessura insuficiente para definir a classe dos Organossolos. Não apresentam horizonte vértico em posição diagnóstica para Vertissolos ou textura exclusivamente areia ou areia franca em todos os horizontes até a profundidade de 150 cm a partir da superfície do solo ou até um contato lítico ou lítico fragmentário. Horizonte plânico, horizonte plíntico, horizonte concrecionário ou horizonte litoplíntico, se presentes, devem estar à profundidade maior que 200 cm a partir da superfície do solo.
Latossolos	Latossolos são solos constituídos por material mineral, apresentando horizonte B latossólico precedido de qualquer tipo de horizonte A dentro de 200 cm a partir da superfície do solo ou dentro de 300 cm se o horizonte A apresenta mais que 150 cm de espessura.
Neossolos	Neossolos são solos pouco evoluídos, constituídos por material mineral ou por material orgânico com menos de 20 cm de espessura, não apresentando nenhum tipo de horizonte B diagnóstico. Horizontes glei, plíntico, vértico e A chernozêmico, quando presentes, não ocorrem em condição diagnóstica para as classes Gleissolos, Plintossolos, Vertissolos e Chernossolos, respectivamente.
Plintossolos	Plintossolos são solos constituídos por material mineral, apresentando horizonte plíntico, litoplíntico ou concrecionário em uma das seguintes condições: a) Iniciando dentro de 40 cm da superfície; ou b) Iniciando dentro de 200 cm da superfície quando precedidos de horizonte glei ou imediatamente abaixo do horizonte A, E ou de outro horizonte que apresente cores pálidas, variegadas ou com mosqueados em quantidade abundante. Quando precedidos de horizonte ou camada de coloração pálida (acinzentada ou amarelado-clara), estes deverão ter cores centradas nos matizes e cromas conforme os itens (a) e (b) definidos abaixo, podendo ocorrer ou não mosqueados de coloração desde avermelhada até amarelada. Quando precedidos de horizontes ou camadas de coloração variegada, pelo menos uma das cores deve satisfazer às condições dos itens (a) e (b) definidos abaixo. Quando precedidos de horizontes ou camadas com matriz de coloração avermelhada ou amarelada, mosqueados deverão ocorrer em quantidade abundante (> 20% em volume) e apresentar matizes e cromas conforme itens (a) e (b) definidos abaixo. a) Matiz 5Y; ou b) Matizes 7,5YR, 10YR ou 2,5Y com croma menor ou igual a 4

Fonte: SANTOS, 2018. Org. Anne C. M. Dirane (2023).

5.2.1. Geologia

A Geologia oferece informações cruciais para analisar e classificar a dinâmica das paisagens naturais. Ao estudar a história da evolução geológica de um ambiente, é

possível entender como a paisagem se formou ao longo do tempo e quais processos atuaram sobre ela. Além disso, a Geologia analisa o grau de coesão das rochas, ou seja, a força com que os minerais ou partículas estão ligados entre si. Essa informação é fundamental para determinar a resistência das rochas à erosão e outros processos de desgaste (Crepani, 2001).

De acordo com o IBGE (2010), a rodovia AM-010 está localizada sobre a Formação Alter do Chão (Cenozóico). Esta formação é composta por diferentes tipos de rochas, como arenitos, siltitos, argilitos e conglomerados.

O nome Alter do Chão pertence ao Grupo Javari, é constituída por arenitos, argilitos e conglomerados (Souza *et al*, 2009), além de horizontes de arenitos silicificados, informalmente denominados de “Arenito Manaus” por Albuquerque (1922) apud Cuervo (2014). Arenitos são rochas sedimentares formadas por grãos de areia, enquanto siltitos são rochas semelhantes, mas com grãos mais finos. Argilitos são rochas compostas principalmente por argila (Rozo, 2004). Conglomerados, por sua vez, são rochas formadas por fragmentos de rochas maiores, como seixos e cascalhos (Souza e Nogueira 2009).

Os arenitos da Formação Alter do Chão podem ser avermelhados ou esbranquiçados, com grãos finos a médios. Os siltitos e argilitos geralmente apresentam coloração avermelhada ou rosada, devido à presença de óxido de ferro (ferruginoso) (Souza e Nogueira 2009). Os conglomerados são mal selecionados, ou seja, possuem fragmentos de diversos tamanhos, e os seixos são arredondados ou subarredondados.

A Formação Alter do Chão é uma formação geológica (**quadro 8**) comum na região amazônica, com idade Cenozóica, o que significa que se formou em tempos geológicos relativamente recentes. As características das rochas que compõem essa formação influenciam diretamente o tipo de solo e a paisagem da região (Souza, 2009).

Quadro 8- Classificação da Geologia

Geologia	Definição
Formação Alter do Chão	Unidade litoestratigráfica (conjunto de rochas com características semelhantes) do Cenozóico (idade geológica), na Bacia Amazônica. É caracterizada por arenitos avermelhados e esbranquiçados, siltitos e argilitos, geralmente avermelhados e rosados, ferruginosos, com conglomerados lenticulares e mal selecionados, com seixos arredondados e subarredondados.
Aluviões Holocênicos	Conglomerados, argilitos e arenitos

Cobertura Dentrítico-Laterítica Paleogênica	Constituiu-se da base para o topo de: zona argilosa caulínica; zona bauxítica com concreções e lentes gibbíticas; zona ferruginosa concrecionária; zona pisolíticanodular, capeamento argiloso no topo.
Terraços Holocênicos	Depósito de planície fluvial, constituídas por cascalhos lenticulares de fundo de canal, areias quartzosas inconsolidadas de barra em pontal, siltes e argilas de transbordamento.
Corpos d'água	Inclui todas as águas interiores, como rios, riachos, canais e outros corpos d'água lineares. Também engloba corpos d'água naturalmente fechados (lagos naturais) e reservatórios artificiais, exceto tanques de aquicultura.

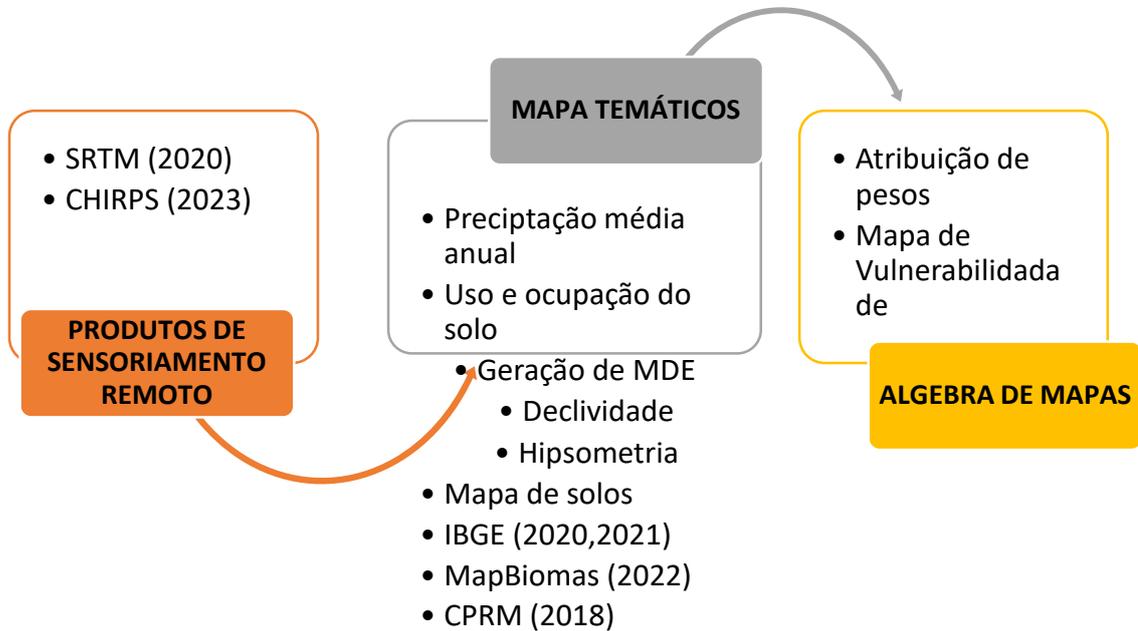
Fonte: IBGE, 2010.

5.3. Procedimentos Operacionais de Geoprocessamento

O auxílio das técnicas de geoprocessamento em SIG (**figura 19**), possibilitaram a elaboração dos produtos temáticos, se tornando essenciais na integração dos dados para a pesquisa da vulnerabilidade erosiva ao longo da rodovia.

O ArcGis 10.8 foi o software utilizado na elaboração dos produtos cartográficos dos temas abordados na pesquisa. Foram elaborados os mapas de localização até o produto final, o mapa de vulnerabilidade erosiva.

Figura 18 - Procedimentos operacionais do geoprocessamento.



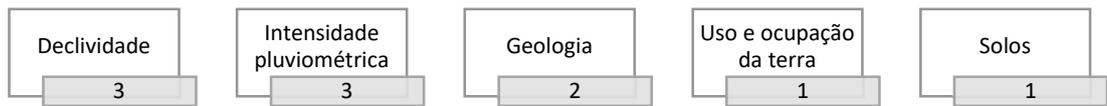
Org. Anne Dirane (2023).

O mapeamento da vulnerabilidade foi realizado a partir da sobreposição do meio físico natural manifesto pelas variáveis de declividade, intensidade pluviométrica, hipsometria, uso e ocupação da terra e solo.

Deste modo, definiu-se as categorias de influência de cada tema (solos, relevo, clima, uso das terras e cobertura vegetal) (**figura 20**) a partir da distribuição de notas para cada classe temática adaptado das classificações dos autores citados e pesos com base do método de análise hierárquica (*Analytic Hierarchy Process* - AHP) dos temas selecionados para posterior derivação do mapa de fragilidade ambiental, utilizando o método de Álgebra de Mapas (*Map Algebra*) no Sistema de Informação Geográfica (SIG) ArcGis.

A integração e avaliação dos dados obtidos será realizada no aplicativo SPRING a partir da ferramenta de suporte de decisão em AHP e a inferência booleana em linguagem LEGAL (INPE, 2006), comparando hierarquicamente como tais componentes ambientais contribuem para o processo erosivo, estabelecendo-se hierarquiza da seguinte forma:

Figura 19 – Variáveis e pesos para o mapeamento da vulnerabilidade



Org. Anne Dirane (2025).

O suporte à decisão AHP, compara as relações de importância das unidades ambientais do mapeamento e atribui determinado peso de importância de cada componente em relação aos demais na influência do processo erosivo. Os pesos serão determinados de 1 a 3, podendo um componente ambiental ter valor igual ao outro.

A Álgebra de Mapa no ArcGIS é a técnica de análise geoespacial que permite realizar operações matemáticas, lógicas ou estatísticas em camadas raster. É uma ferramenta que combina, transforma e analisa dados geoespaciais, gerando novas informações a partir de relações ou interações entre diferentes camadas de dados. Essa nova funcionalidade, a ferramenta Raster Calculato no ArcGIS, utiliza expressões matemáticas para processar dados raster, produzindo novos mapas. A álgebra de mapas se baseia em expressões matemáticas aplicadas pixel a pixel nas camadas raster envolvidas. Cada pixel em uma camada raster possui um valor numérico que pode representar variações como altitude, temperatura, declividade, uso e cobertura da terra, solos e etc. A álgebra de mapas realiza operações nesses valores para gerar um novo raster que reflete o resultado das operações.

A escala de vulnerabilidade à erosão (**quadro 9**), adaptada das definições de Crepani *et al.* (2001) e utilizadas neste trabalho ficou:

Quadro 9 - Escala de vulnerabilidade a erosão.

Vulnerabilidade	Classe Temática	Características
1,0	Baixa	Áreas de maior estabilidade, ocorrendo predomínio dos processos pedogenéticos, com cobertura vegetal densa, e relevo suave.
2,0	Média	Áreas com balanço entre as interferências morfogenéticas e pedogenéticas.

3,0	Alta	Predomínio da morfogênese, com áreas altamente vulneráveis, com elevado grau de processo de erosivos.
-----	------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------

Org. Anne C. M. Dirane (2024).

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1. Mapeamento e caracterização das voçorocas e a rodovia AM – 010

Durante os últimos 10 anos, os trabalhos de cadastramento, monitoramento e análise de voçorocas ao longo de rodovias na Região Metropolitana de Manaus se intensificaram, entre elas está a rodovia estadual AM – 010, onde foram desenvolvidas pesquisas de iniciação científica, trabalho de conclusão de curso e dissertações de mestrado.

Na pesquisa realizada em 2014, foram cadastradas e monitoradas 15 incisões erosivas do tipo voçoroca (**quadro 10**), nas quais foram coletadas as coordenadas geográficas e informações morfométricas, quanto ao comprimento, largura e profundidade, bem como dados quanto ao tipo, forma, tamanho e previsão de risco da incisão para a pista. Todas as informações obtidas foram organizadas na ficha de cadastro, juntamente com as observações feitas em campo, para auxiliar na análise da pesquisa.

O **quadro 10** apresenta informações acerca das voçorocas cadastrada em 2014 na rodovia AM – 010.

Quadro 10 - Voçorocas cadastradas na rodovia AM-010 (2014) e situação atual (2025).

Voçoroca	KM	Tipo	Forma	2014	2025
1	11	Conectada	Retangular	Inexistente	Inativa
2	32	Desconectada	Bifurcada	Inexistente	Inativa
3	42	Desconectada	Linear	Inexistente	Ativa
4	46	Conectada	Bifurcada	Ativa	Inexistente
5	46	Conectada	Retangular	Ativa	Inexistente

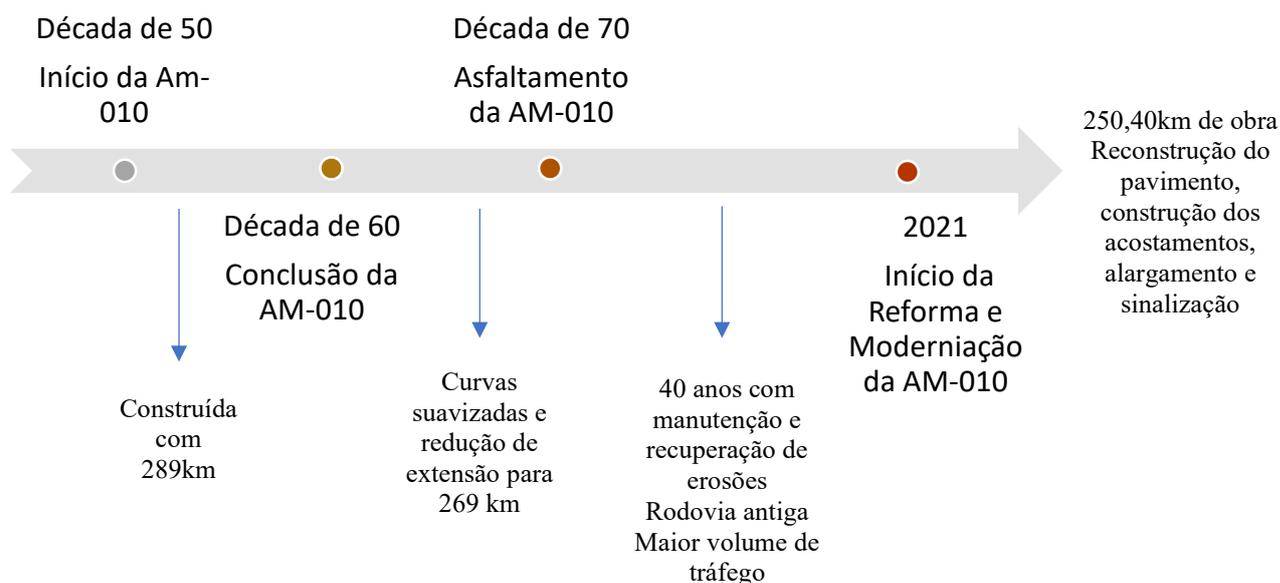
6	52	Integrada	Irregular	Inexistente	Inativa
7*	104	Conectada	Bifurcada	Ativa	Ativa
8*	104	Conectada	Retangular	Ativa	
9	116	Conectada	Irregular	Ativa	Inexistente
10	125	Conectada	Retangular	Ativa	Inexistente
11	135	Integrada	Irregular	Ativa	Inexistente
12	135,6	Conectada	Linear	Ativa	Inexistente
13	136	Desconectada	Ramificada	Ativa	Inexistente
14	136	Desconectada	Ramificada	Ativa	Inexistente
15	136	Desconectada	Retangular	Ativa	Inexistente
16	136	Conectada	Bifurcada	Ativa	Inexistente
17	136	Conectada	Bifurcada	Ativa	Inexistente
18	137	Desconectada	Retangular	Ativa	Inexistente
19	137	Conectada	Bifurcada	Ativa	Inexistente
20	178	Conectada	Retangular	Inexistente	Ativa

*As duas voçorocas do km 104 cresceram e acabaram se juntando.

Org.: Anne Dirane, 2023.

A malha rodoviária é insipiente no Amazonas, deixando as rodovias existentes muito utilizadas. A AM-010 é uma rodovia com 60 anos e com pouca intervenção (**figura 21**), no que diz respeito a estrutura e pavimento. Esse eixo rodoviário, por má execução e falta de drenagem, baixa manutenção e intempéries naturais, sofre com problemas decorrentes da erosão.

Figura 20: Cronologia da construção e reconstrução da AM-010.



Fonte: SEINFRA, 2021.

No ano de 2022 começaram as obras de reforma da AM – 010, que beneficia diretamente os municípios e Manaus, Rio Preto da Eva e Itacoatiara e indiretamente os municípios de Silves (AM – 330), Itapiranga (AM – 363), São Sebastião do Uatumã, Urucará e Urucurituba, os quatro últimos com acesso por via fluvial.

Desde 2023 a rodovia está passando por uma reconstrução, o que mudou consideravelmente sua estrutura, deixando bem diferente do que era no ano de 2014. No último monitoramento realizado na AM-010, foi constatado a inexistência de 14 voçorocas (conforme já apresentado no quadro 10), restando somente uma, localizada no km 104, remanescente do cadastro realizado em 2014. A rodovia foi bastante modificada (aterramento, alargamento de trecho, introdução drenagem etc), suavizada (diminuição do declive) em alguns trechos, com o material retirado sendo depositado em outra extensão da rodovia (**figura 22**).

Figura 21 – Solo retirado de km 137 da rodovia AM-010 e depositado no km 148.



Fonte: Anne Dirane, 2025.

Figura 22 - Resultado da alteração da rodovia AM-010, km 117, Figura A (2014) e figura B (2024).



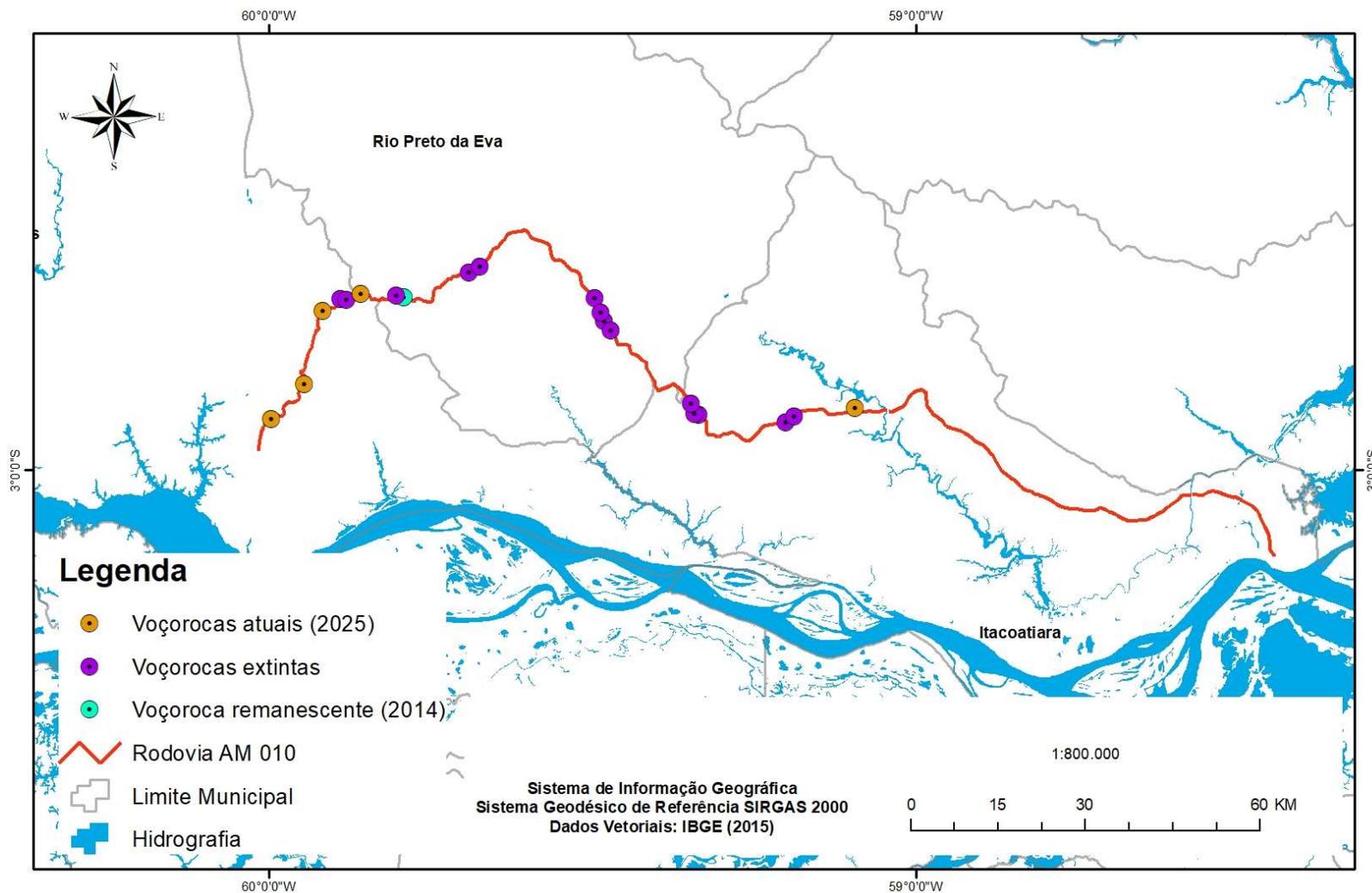
Fonte: Anne Dirane, 2024.

A ação antrópica contribui expressivamente para o aumento da erosão dos solos, sobretudo em regiões urbanas, através de diversas práticas e processos. As obras de construção de estradas alteram a topografia natural (**figura 23**), reduzindo a capacidade do solo em absorver água que ocasiona o escoamento superficial, favorecendo o processo erosivo.

A reconstrução da AM-010, com a terraplanagem, eliminou as voçorocas que haviam sido mapeadas em 2014, restando apenas uma incisão, das 15 que foram cadastradas (**figura 24**).

Figura 23 - Voçorocas mapeadas na rodovia AM-010.

Mapeamento das Voçorocas AM 010



Org.: Anne Dirane, 2023

A rodovia recebeu uma nova estrutura, o que causou a remoção das voçorocas e deu uma nova modelagem ao relevo. A **figura 25** evidencia o quanto a rodovia sofreu alteração, mostrando o morro residual. Essa nova configuração é percebida em vários trechos da estrada.

Figura 24 - Resíduo de relevo da rodovia AM-010.



Fonte: Anne Dirane, 2024.

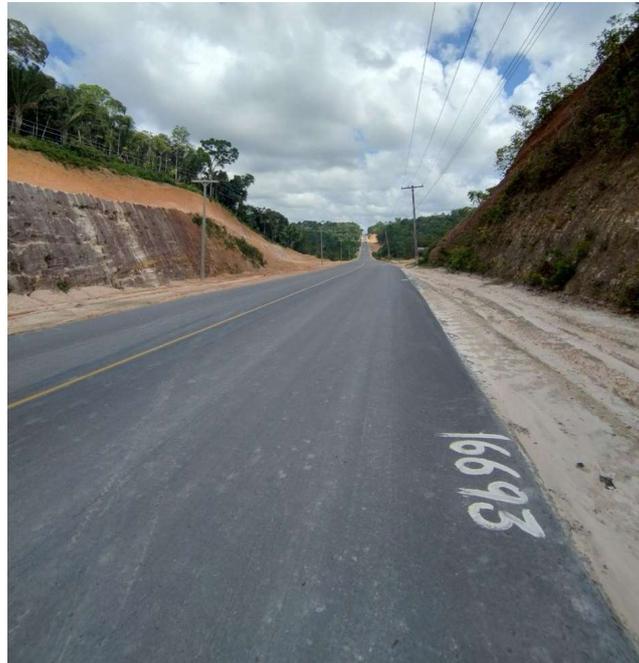
A Rodovia recebeu acostamentos e/ou faixas laterais ampliados em 1,50 m para cada margem da estrada, conforme a **figura 26**. Foi necessário a supressão em trechos determinandos para melhoria da infraestrutura o que deixou o boa parte do solo descoberto, nos referidos trechos (**figura 27**).

Figura 25 - Esquema de faixas laterais inseridos na rodovia AM-010



Fonte: SEINFRA (2021).

Figura 26 - Rodovia AM-010 ampliada com faixa lateral.



Fonte: Anne Dirane, 2024.

A falta de cobertura vegetal expõe o solo as intempéries, deixando-os mais vulneráveis, associados as infraestruturas, como as canaletas, o processo erosivo pode expandir com muita celeridade, intensificando o processo e atingindo áreas próximas.

Ao longo da rodovia AM-010 é comum o uso das canaletas (**figura 28**), que exercem uma função básica, consistindo no direcionamento e escoamento das águas da chuva, diminuindo os riscos de enchentes, danos à pavimentação e a erosão.

Figura 27 - Canaletas ao longo da rodovia AM-010.



Fonte: Anne Dirane, 2024.

O objetivo das canaletas são deter o fluxo de água que escorre nas pistas e nas margens ds rodovias, evitando seu acúmulo na superfície, prevenindo a segurança dos motoristas. O direcionamento da água para as canaletas contribui com a redução de saturação dos solos ao longo da rodovia e minimizaria grandes danos. Mas o que ocorre na AM-010 é o oposto. A falta de planejamento ou a má qualidade empregada no material utilizado para a as canaletas, faz com que o escoamento aconteça de forma descontrolada, desestabilizando a encosta (**figura 29**). Na maioria das canaletas encontradas na rodovia, antes e durante a reconstrução, acabam tendo a função contrária, pois se rompem ou se desagregam no meio da encosta, favorecendo o escoamento concentrado (**figura 30**), ou não acompanham a vertente até a base, como mostra a figura 29.

Figura 28 - Canaletas favorecendo o escoamento superficial concentrado.



Fonte: Anne Dirane, 2024.

Figura 29 – Canaletas e o solo exposto na rodovia AM-010.



Fonte: Anne Dirane, 2024.

Os trechos da rodovia com relevo alterado recebem gramíneas (**figura 31**) para o controle de erosão, que é uma prática sustentável e acessível, estabilizando ou prevenindo o processo erosivo. O sistema radicular profundo das gramíneas auxilia no fixamento do solo, suavizando o escoamento e propiciando a infiltração da água. A hidrossemeadura é um processo de revestimento vegetal e estabilização de solos utilizado para recuperação de grandes áreas, principalmente áreas íngremes de ou aterro, onde há necessidade de um rápido recobrimento do solo evitando ou pelo menos diminuindo o processo erosivo (Afonso; Freitas, 2003).

Figura 30 – Trecho da rodovia AM-010 (A - 2024) e (B – 2025) com vegetação decorrente da hidrossemeadura,



Fonte: Anne Dirane, 2024 e 2025.

Nas encostas com maior declividade foi necessário o terraceamento (**figura 32**), para enfraquecer o fluxo da água e reduzir a erosão em áreas com declínio. Os terraços são degraus no solo, conduzindo a velocidade do escoamento e promovendo a infiltração da água no solo.

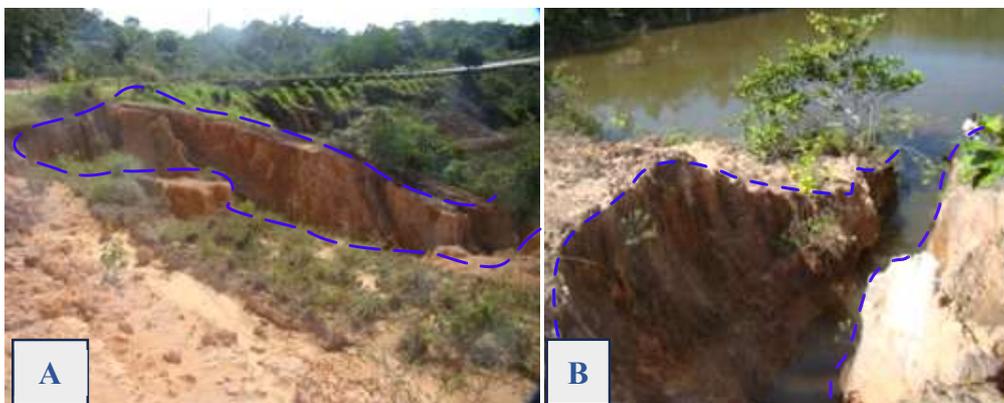
Figura 31 - Terraceamento na vertente, rodovia AM-010.



Fonte: Anne Dirane, 2024.

A voçoroca remanescente do cadastro realizado em 2014, está localizada no km 104, onde costavam duas voçorocas (**figura 33**), 10 anos depois, foi constatada a evolução da mesma, as cabeceiras se conectaram e passaram por feições de retrabalhamento, mudando totalmente a forma, passando a ser irregular e do tipo integrada, pois faz conexão com topo da vertente e o fundo do vale (**figura 34**).

Figura 32 - Voçorocas mapeadas no km 104, AM-010 (2014)



Org.: Anne Dirane, 2014.

Figura 33- Voçoroca km 104, AM-010 (2024).



Fonte: Anne Dirane, 2024.

No monitoramento de 2025, foram mapeadas 05 voçorocas, localizadas nos km 11, 32, 42, 52 e 178 (**quadro 11**) com sua origem em materia depositado, inconsolidado e exposto. Das cinco incisões erosivas, três são do tipo desconectada. No monitoramento realizado em 2024, essas voçorocas não existiam, evidenciando que o solo exposto em vertentes (**figura 35**) com inclinação acima de 8° propiciam o surgimento das feições. No km 32, há presença de solo inconsolidado, proveniente de aterros, favorecendo o escoamento em lençol, que por conta da declividade, vai se concentrando, formando muitos sulcos, evoluindo para voçorocas do tipo linear.

Figura 34 – Voçoroca e conjunto de sulcos localizados no km 32, AM-010.



Fonte: Vieira e Anne Dirane, 2025.

Quadro 11 – Voçorocas cadastradas em 2025 na rodovia AM-010.

Km	Tipo	Forma	Largura (m)	Comprimento (m)	Profundidade (m)	Situação
11	Desconectada	Linear	1,4	2,40	0,90	Ativa
32	Desconectada	Linear	1,2	9	1,4	Ativa (aterro)
42	Desconetada	Bifurcada	9,2	8	1,4	Ativa (aterro)
52	Integrada	Irregular	5,2	17	4,3	Inativa
178	Conectada	Bifurcada	35	78	17	Ativa (aterro)

Org.: Anne Dirane, 2025.

A reconstrução da rodovia e a nova pavimentação facilitou muito a trafegabilidade e o fluxo de veículos, mas devemos salientar que assim como a construção, a reconstrução também é causadora de impactos ambientais negativos. Zaine (2010) enfatizam que a ação humana tem consequências geológico-geomorfológicas em três níveis, designadamente: na modificação do relevo, na alteração da dinâmica geomorfológica, bem como na criação dos depósitos tecnogênicos (**figura 35**). As paisagens naturais são constantemente modificadas, dessa forma, tais depósitos só a ação geológica humana, mas também o comportamento das paisagens atuais. (Vaz, *et al.*, 2019).

Figura 35 - Depósitos tecnogênicos, rodovia AM-010.



Fonte: Anne Dirane, 2024.

Muito comum a ocorrência de depósitos tecnogênicos em vários trechos da AM-010, que podem ser classificados de acordo com Pellogia (1999) como depósitos remobilizados, constituídos de materiais sedimentares, que sofre influência antrópica somente no processo, sendo o material constituinte natural. Essas áreas estão mais predispostas a formação de processos erosivos, pois muitas vezes o material é inconsolidado, como na **figura 36**.

Figura 36 - Formação de sulco em superfície com depósito de material inconsolidado.



Fonte: Anne Dirane, 2024.

6.2. Mapa temático para declividade

A construção de rodovias é uma atividade com potencial para a degradação, sobretudo quando há exposição do solo, deixando vulnerável a erosão. Para o mapeamento da vulnerabilidade, foram necessários mapas bases, para declividade, intensidade pluviométrica, hipsometria, uso e cobertura da terra e solos.

A declividade do terreno é uma variável importante e necessária no que diz respeito a análise erosiva, principalmente em rodovias. A inclinação da vertente exerce influência na velocidade da água, resultando no desprendimento e partículas, no transporte de sedimentos, no escoamento, infiltração e erosão.

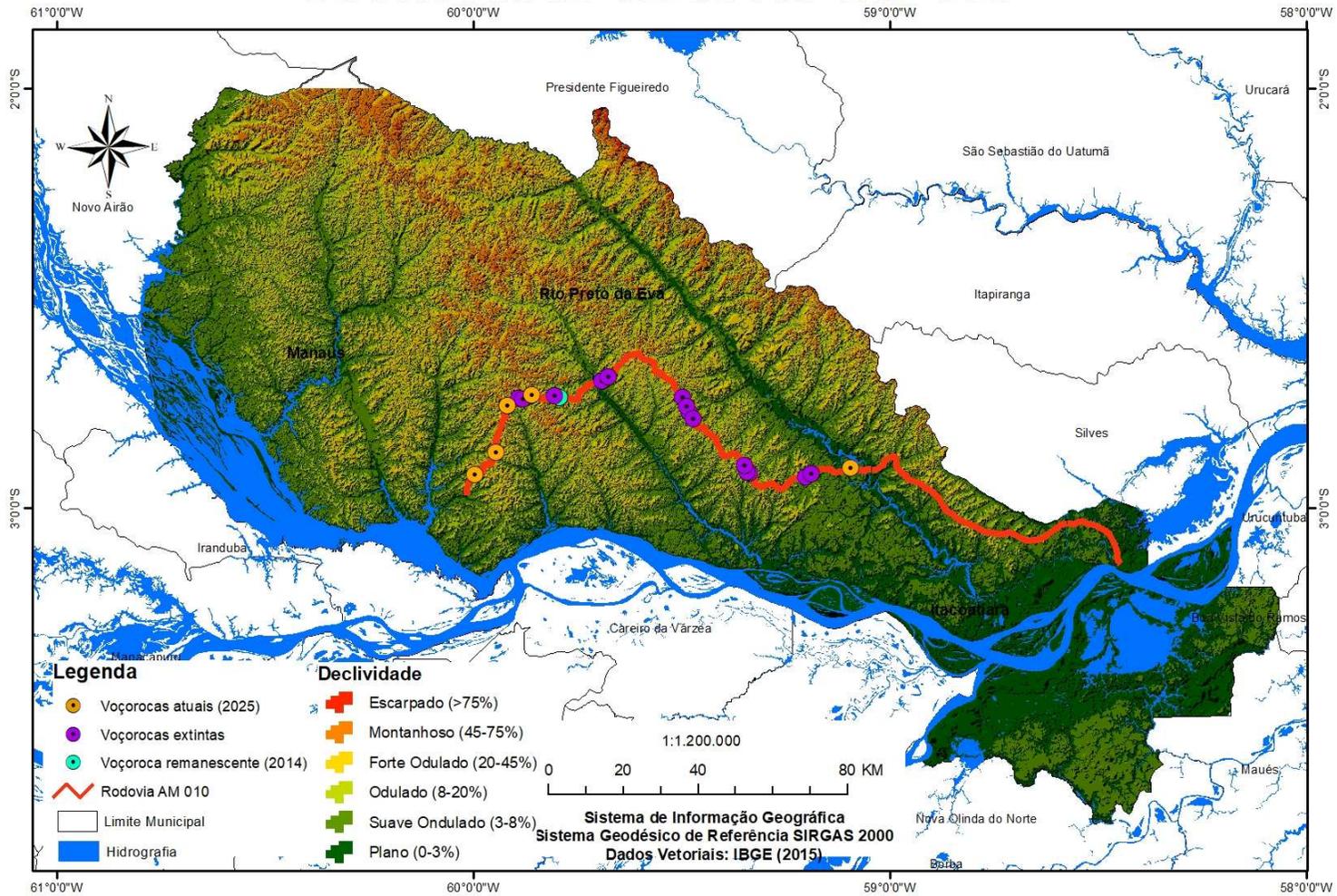
Em áreas mais inclinadas, sobretudo as que sofreram em decorrência da ação antrópica, a ação da gravidade é mais intensa, favorecendo a transposição de sedimentos,

bem como as águas pluviais resvalam rapidamente, reduzindo a infiltração, direcionando o escoamento superficial e propiciando a erosão.

O mapeamento das voçorocas realizado em 2014, evidenciou a ocorrência das incisões em relevo com declividade acentuada (**figura 37**), em vertente com suave ondulação e ondulação. Os dados obtidos no passado, ainda servem para as voçorocas monitoradas no decorrente ano.

Figura 37: - Mapa de declividade da rodovia AM-010.

Declividade Rodovia AM 010



Org. Anne Dirane, 2025.

6.3. Mapa temático para índice pluviométrico

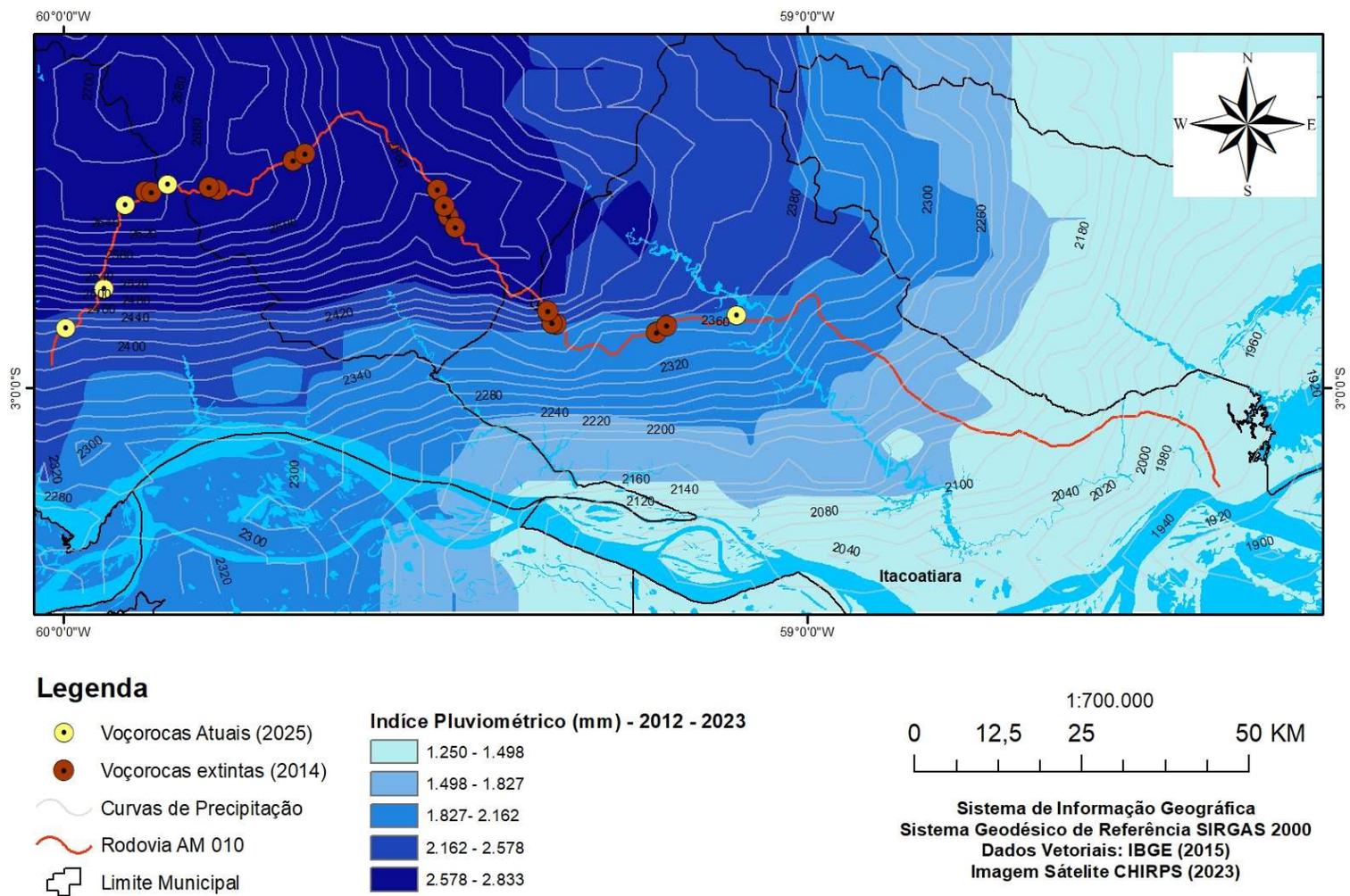
Muitos fatores indicam que a pluviometria se faz muito necessário para a análise da vulnerabilidade a processos erosivos. O índice pluviométrico prediz o quantitativo total de chuva em um determinado período. Na região amazônica a quantidade de chuva apresenta inconstância interanuais significativas (D'Ávila Júnior; Vieira, 2019).

A resposta dos satélites se mostra eficaz na estimativa de precipitação (**figura 38**), fator muito importante para os estudos climatológicos no Amazonas, uma vez que há falhas nas estações pluviométrica comprometendo a regularidade dos dados (Oliveira *et al.*, 2023).

A região Amazônica apresenta uma grande variação no espaço e tempo de sua precipitação, com média anual de 2300 mm, mas possui uma variação de 1600 a 3000 mm anual no oeste, noroeste e litoral norte da Amazônia (Figueroa; Nobre, 1990)

Figura 38 - Mapa de índice pluviométrico da rodovia AM-010.

Índice Pluviométrico Anual da Rodovia AM-010



Org.: Anne Dirane, 2024.

Ao longo da rodovia AM-010, a pluviosidade anual foi contabilizada nos anos de 2012 a 2023, com índice mínimo de 1250mm e máximo de 2833mm. O índice pluviométrico é primordial para o entendimento e a prevenção á vulnerabilidade erosiva de uma determinada área (CHIRPS, 2023).

Crepani et.al (2001), afirma que o clima de uma determinada região tem poder de influenciar o intemperismo no local. O grau de erosão resultante do processo da relação entre a chuva e o solo dependem da pluviosidade total, distribuição sazonal e a intensidade pluviométrica (Crepani *et al.* 2001).

Considerando a rodovia AM-010, a intensidade pluviométrica é importante, mas deve estar associada aos fatores geomorfológicos.

A distribuição das chuvas ao longo do ano na região amazônica possui grande variação, induzindo as características dos demais elementos climáticos como temperatura e umidade (Oliveira *et al.*, 2023).

As voçorocas identificadas na rodovia, estavam posicionadas na vertente na altura entre 100 e 140m, que eram as zonas mais vulneráveis à erosão, influenciadas pelo escoamento das águas. As áreas mais elevadas podem reter mais água, deixando o solo saturado e o terreno instável, bem como determinar o crescimento de diferentes vegetações de acordo com a altitude.

6.4. Mapa temático para Uso e ocupação da terra

Para o uso e cobertura da terra a vegetação é uma variável importante para a análise da vulnerabilidade a erosão. A cobertura vegetal tem relação com o aumento dos efeitos causados pelas gotas de chuva, quando ocorre quando as partículas do solo são desprendidas e transportadas pelo fluxo de água e depositadas em outra parte do terreno (Guerra, 2006).

A vegetação ajuda a reter água no solo, aumentando a porosidade e a permeabilidade, aumentando a capacidade de infiltração do solo, reduzindo a compactação do solo e aumentando o escoamento superficial., sendo um estabilizador natural do ambiente.

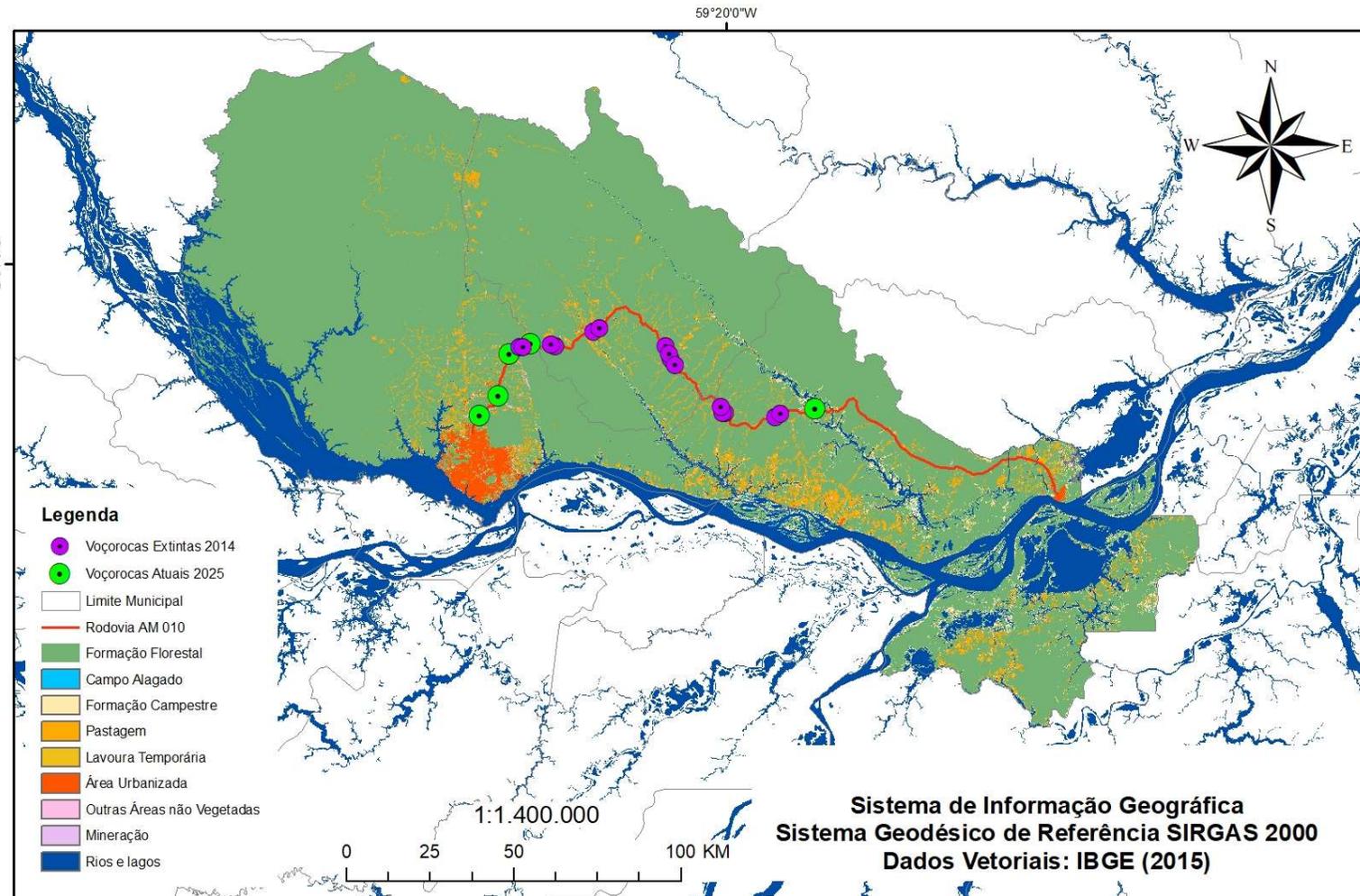
De acordo com o mapa, a rodovia é composta em boa parte de florestas, estando presente a formação campestre, áreas de pastagens e área urbana. As voçorocas se concentram as áreas onde há solo exposto, que estão distribuídos ao longo da rodovia.

Modificações na cobertura vegetal afetam diretamente o solo e sua capacidade de resistência a erosão, portanto, o mapeamento do uso e cobertura do solo cooperam na identificação de áreas com diferentes tipos de uso, para relacionar com outras variáveis, para compreender as mais vulneráveis a erosão.

Na rodovia AM-010, boa parte da faixa de domínio, que são 70 m de cada margem da rodovia, a formação florestal é densa, com área de florestas alagadas e áreas urbanas. Em alguns trechos há presença de rios e lagos, como mostra a **figura 39**.

Figura 39 - Mapa de uso e ocupação da terra.

Uso e Ocupação da Terra Rodovia AM 010



Org. Anne Dirane 2025.

A expansão urbana e a necessidade de sociais alteram significativamente a cobertura do solo, nesse sentido as geotecnologias propiciam o monitoramento constante e a disponibilidade de dados, subsidiando o entendimento de como o uso do solo altera a sua dinâmica, para planejar e desenvolver políticas públicas para possíveis impactos.

O uso de imagens de satélites para o mapeamento do uso e cobertura da terra fornece informações que possibilitam a compreensão da vulnerabilidade a processos erosivos, planejando e adotando estratégias apropriadas para a conservação do solo e uso da terra.

6.5. Mapa temático para Solos

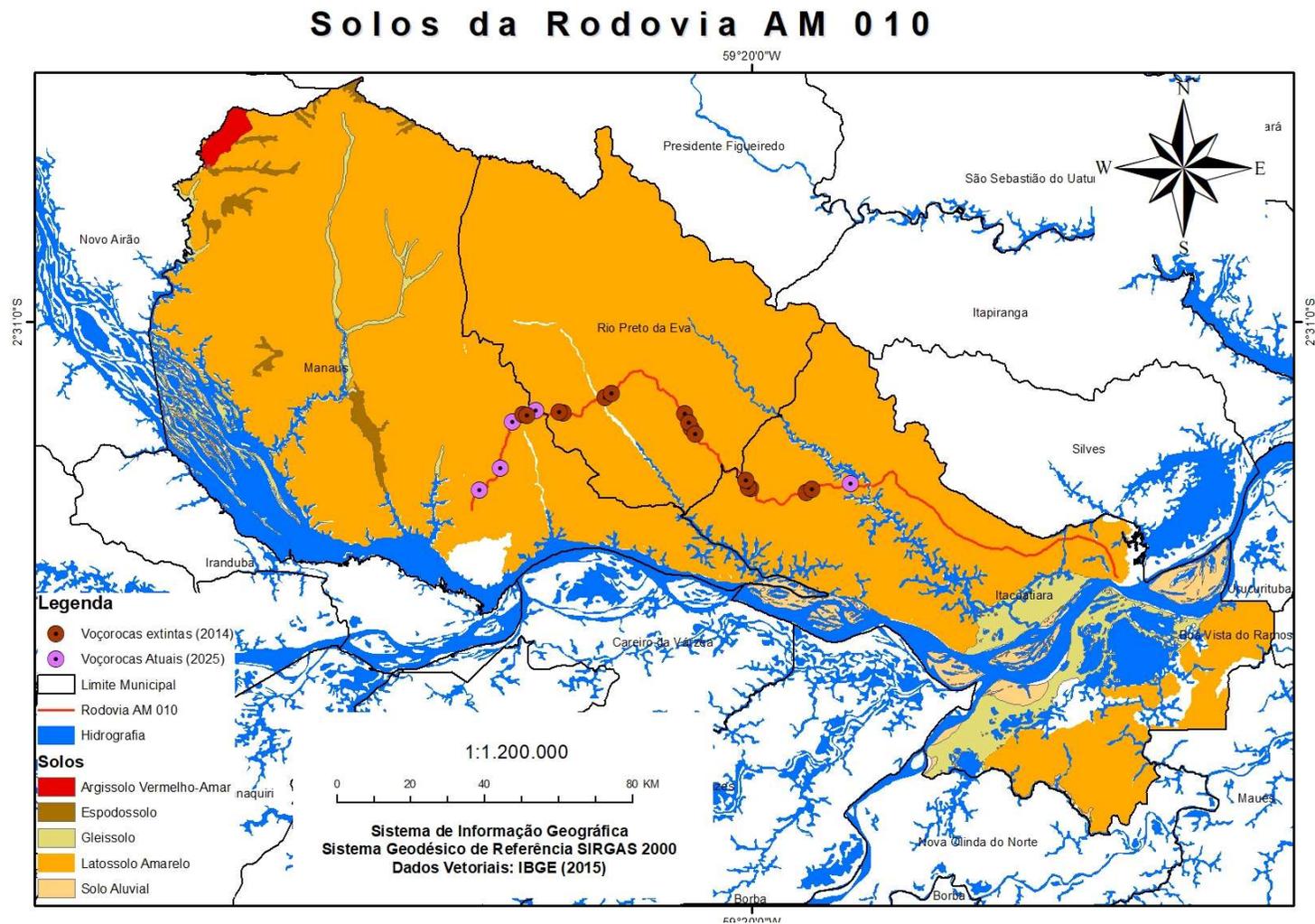
As características pedológicas como a estrutura, textura e compactação dizem muito sobre o quanto o solo é vulnerável a erosão. Na área de estudo, os solos mais finos e argilosos são mais inclinados à erosão, bem como a pouca absorção de água facilita o fluxo superficial.

Essas características do solo são propriedades dinâmicas, pois podem ser alteradas a todo tempo e sob diferentes usos da terra, manejo superficial do solo, e sistemas de agricultura e, assim, conseqüentemente, sua erodibilidade também muda ao longo do tempo (Vitte et al, 2007). Deve-se levar em consideração também o estado inicial dos solos, que pode variar ao longo do tempo, após um evento chuvoso ou ainda pelo seu uso, produzindo assim modificações na erodibilidade (Guerra, 1994).

Solos com vegetação, são mais resistentes ao processo erosivo, na AM-010 a vegetação foi suprimida, deixando o solo exposto e vulnerável. Com predominância do latossolo amarelo, que de acordo com a EMPRABA (2006) é um solo residual maduro, sendo o material de origem relacionado à cobertura sedimentar terciária (Formação Barreiras). Exibem boas condições físicas de retenção de umidade e boa permeabilidade, encontrados no relevo plano ou suavemente ondulado, quando compactado, favorecem a erosão, pois são extremamente duros quando estão secos.

A **figura 40** mostra a distribuição das voçorocas ao longo da rodovia e a concentração das mesmas em determinados trechos.

Figura 40 - Mapa de solos, rodovia AM-010.



Org. Anne Dirane, 2025.

Figura 41 - Solo exposto na rodovia AM-010.



Fonte: Anne Dirane, 2024.

6.6. Mapa temático para a Geologia

Conforme Torres (2014), uma unidade de paisagem natural é definida pela combinação de alguns elementos, entre eles, os constituintes rochosos. As características litológicas são fatores importantes por considerar a mineralogia, o tamanho dos grãos e as estruturas geológicas que determinam a orientação e os locais mais propícios para o desenvolvimento da erosão.

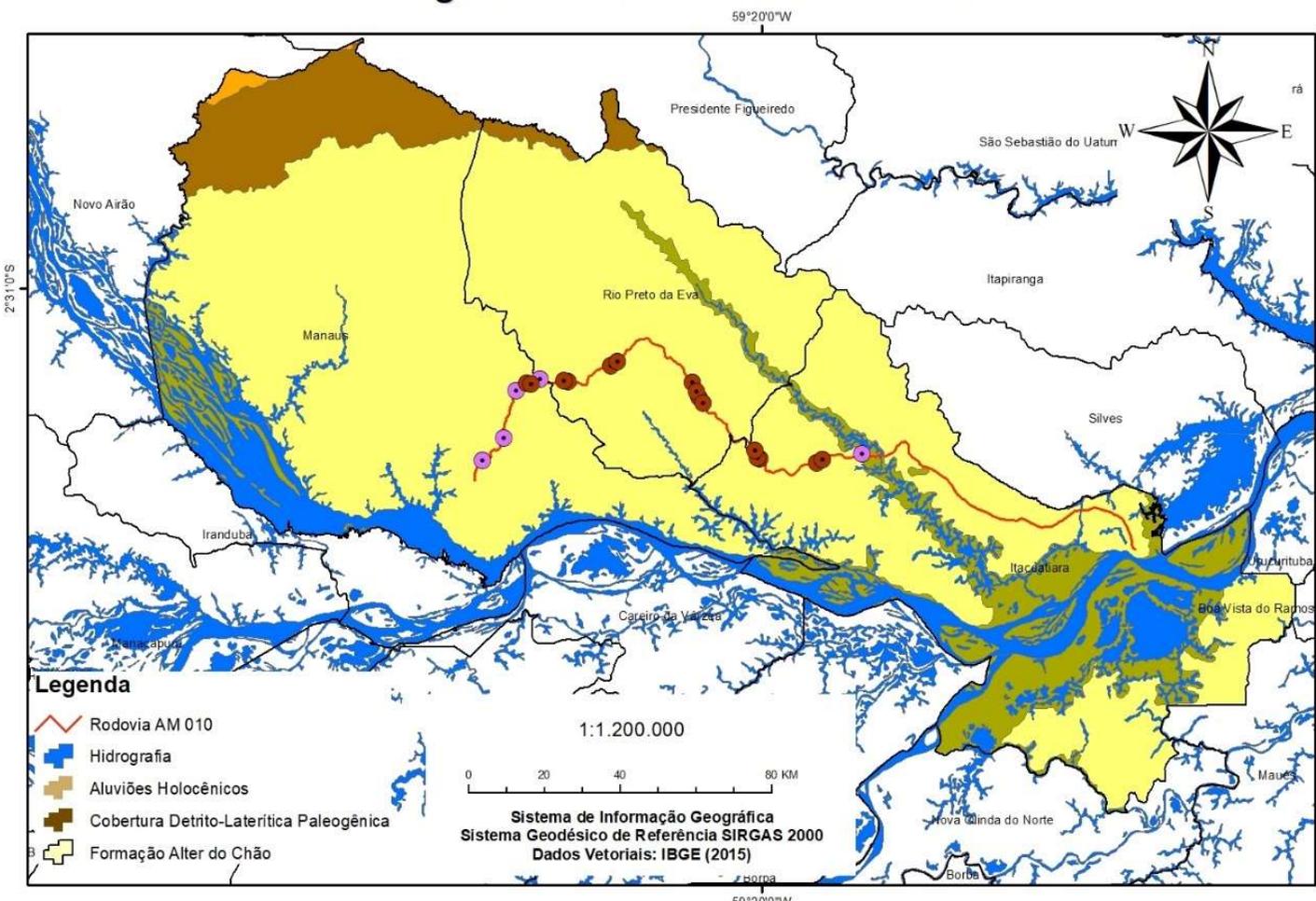
O abaixamento suportado pela região da Bacia Amazônica, no período Cretáceo, propiciou um processo de sedimentação nos sistemas fluviais, lacustres ou deltaicos de ambiente continental (Igreja, 2000).

A Formação Alter do Chão (**figura 42**) é composta predominantemente por arenitos, com intercalações de argilitos e siltitos. Conglomerados avermelhados também ocorrem, embora em menor proporção. Essa descrição está de acordo com os estudos de Daemon (1975), Caputo (1972) e Souza & Nogueira (2009).

Os arenitos da Formação Alter do Chão, conforme descrito por Igreja e Frazinelli (2011), variam de finos a grossos, de coloração vermelha. São argilosos, mal selecionados, friáveis e ocasionalmente silicificados. Costa et al. (1978) apud Vieira (2008) complementam essa descrição, destacando que a granulação varia de fina a grossa e a coloração alterna entre branca, rósea, vermelha e cinza-claro, podendo apresentar concreções lateríticas.

Figura 42– Geologia da Rodovia AM-010.

Geologia da Rodovia AM 010



Org.: Anne Dirane, 2025.

6.7. Perfil topográfico da rodovia AM-010

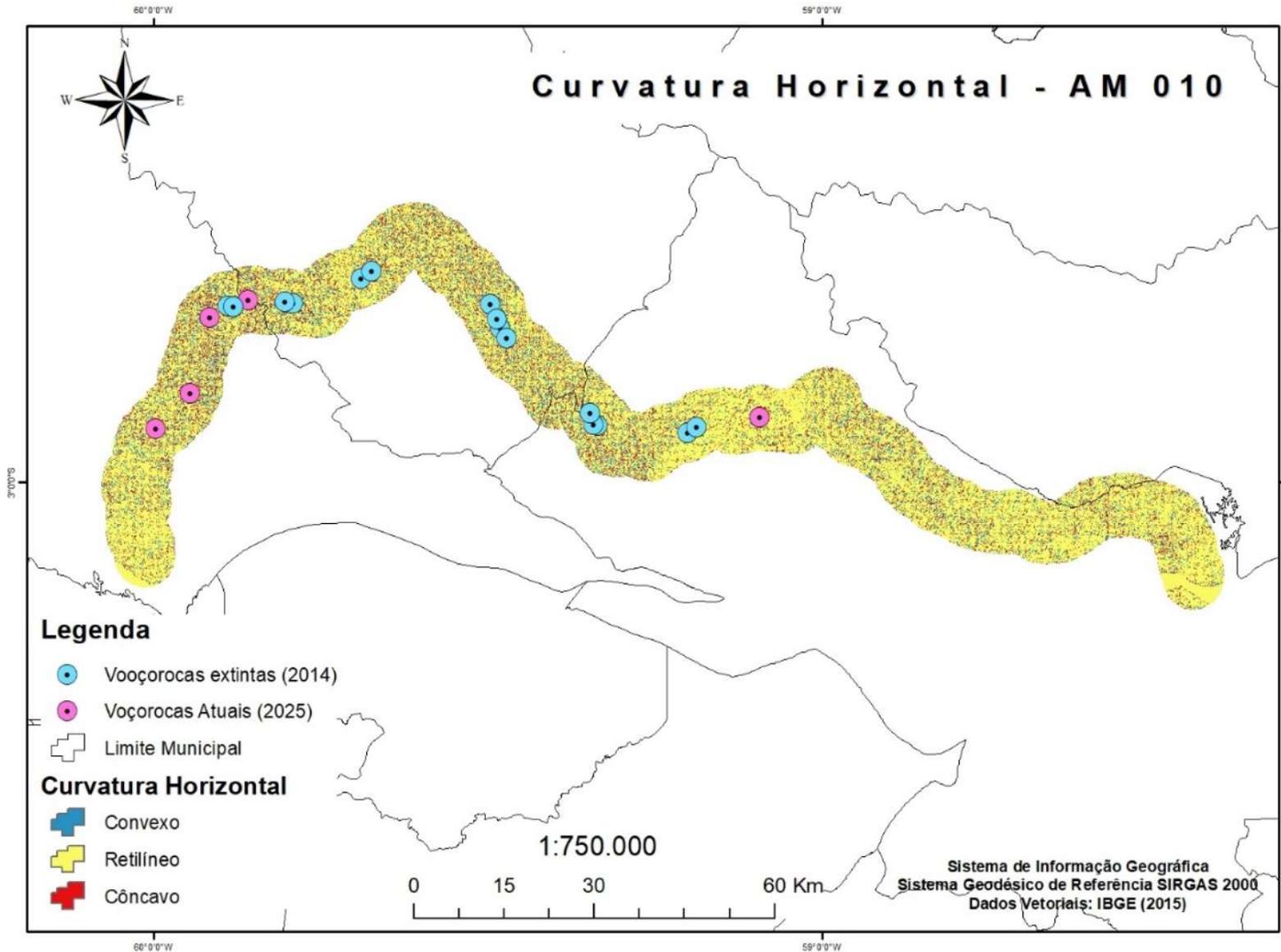
O perfil topográfico exhibe as variações do relevo através de uma representação gráfica, através do corte vertical. A aplicabilidade se dá no entendimento da geomorfologia do terreno e se torna fundamental no planejamento de estradas, na análise de processos erosivos e o desenvolvimento territorial.

A análise da morfogênese acentuada por provocações de agentes internos e externos proporcionam subsídios para a compreensão dos processos morfogenéticos ao longo do tempo, que ajudam no entendimento das novas dinâmicas a partir das ações humanas e suas relações com o ambiente. A análise digital do relevo fornece objetividade e exatidão nos mapeamentos geomorfológicos tradicionais (Minar e Evans, 2018). No estudo em questão, o perfil topográfico foi imprescindível na análise do relevo, confirmando o tipo do relevo no qual as voçorocas se concentram. Para as análises, foram utilizadas somente as voçorocas que ficaram na margem da rodovia.

A **figura 43** mostra a curvatura horizontal da área de abrangência da rodovia AM-010, evidenciando o tipo de vertente onde estão localizadas as voçorocas. As incisões estão presentes na vertente de forma côncava, cuja curvatura se dá no seu interior formando a concavidade ao longo da vertente. As vertentes côncavas possuem declividade suave, facilitando o fluxo de água e o acúmulo no segmento inferior.

A curvatura horizontal possibilita complementar o estudo do terreno, identificando padrões de paisagem, a influência do relevo no uso da terra, no planejamento de rodovias e infraestrutura, além de ajudar na análise do processo erosivo e nas dinâmicas do solo. A inclinação e os desníveis mostram aonde é mais provável ocorrer a erosão e onde os sedimentos tendem a se acumular, o que afeta a qualidade do solo e a vegetação local.

Figura 43 - Mapa de perfil da vertente, AM-010.



Org.: Anne Dirane, 2024.

Concomitante a análise de curvatura horizontal, é indispensável o mapeamento da curvatura vertical ou curvatura do plano, facilitando a interpretação do relevo. De acordo com Ross:

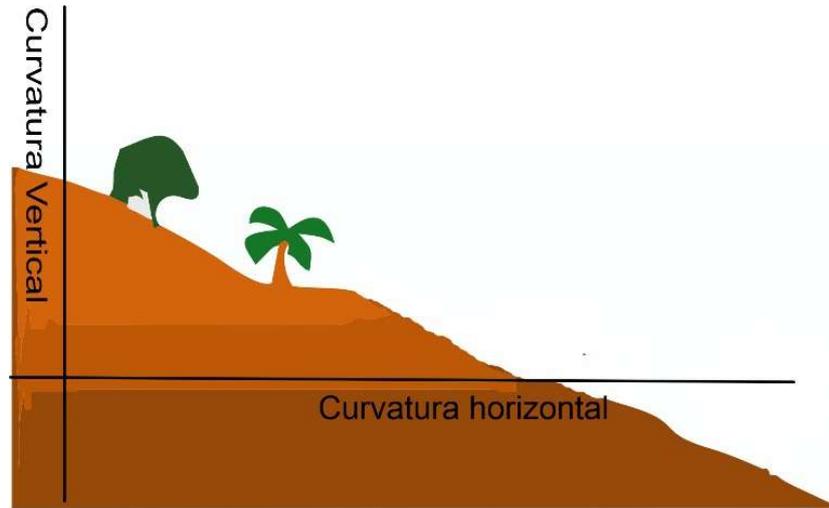
interpretar o relevo não é simplesmente saber identificar padrões de formas ou tipos de vertentes e vales, não é simplesmente saber descrever o comportamento geométrico das formas, mas saber identificá-las e correlacioná-las com os processos atuais e pretéritos, responsáveis por tais modelados... (Ross, 1990, p. 17)

Um dos desafios para a representação cartográfica das informações obtidas através de imagens de satélite e escolher o procedimento mais adequado, uma vez que existem diversas técnicas, que podem variar de acordo os objetivos, a área da pesquisa e a escala a ser analisada.

A figura abaixo mostra o esquema dos dados coletados com o mapeamento das formas do relevo, que mostra o perfil das vertentes, traçados a partir do corte paralelo a rodovia e o direcionamento do fluxo, traçados a partir da curvatura horizontal (**figura 44**).

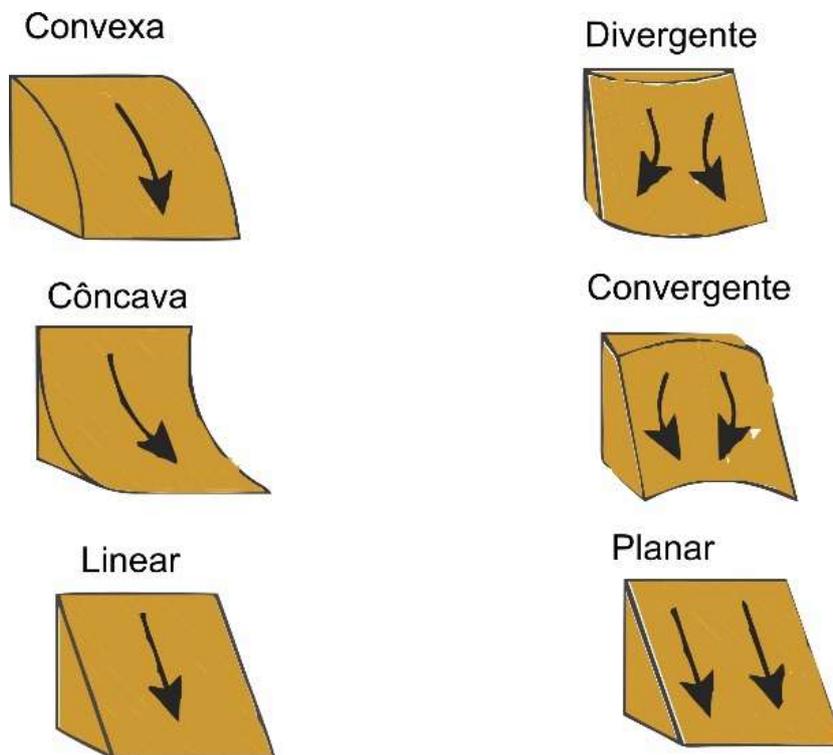
Quanto ao perfil da vertente, aonde as voçorocas foram mapeadas, elas se encontram em perfil côncavo e com o direcionamento do fluxo divergente. O desenvolvimento quanto a forma das voçorocas, que foram mapeadas e monitoradas nos trabalhos e campo, atestam as informações obtidas através do mapeamento do direcionamento do fluxo (**figura 45**), indicando a divergência na área de contribuição, convergindo para as cabeceiras e modificando a sua forma, depositando os sedimentos de forma espaiada.

Figura 44 - Esquema de coleta de dados d curvatura vertical e horizontal.



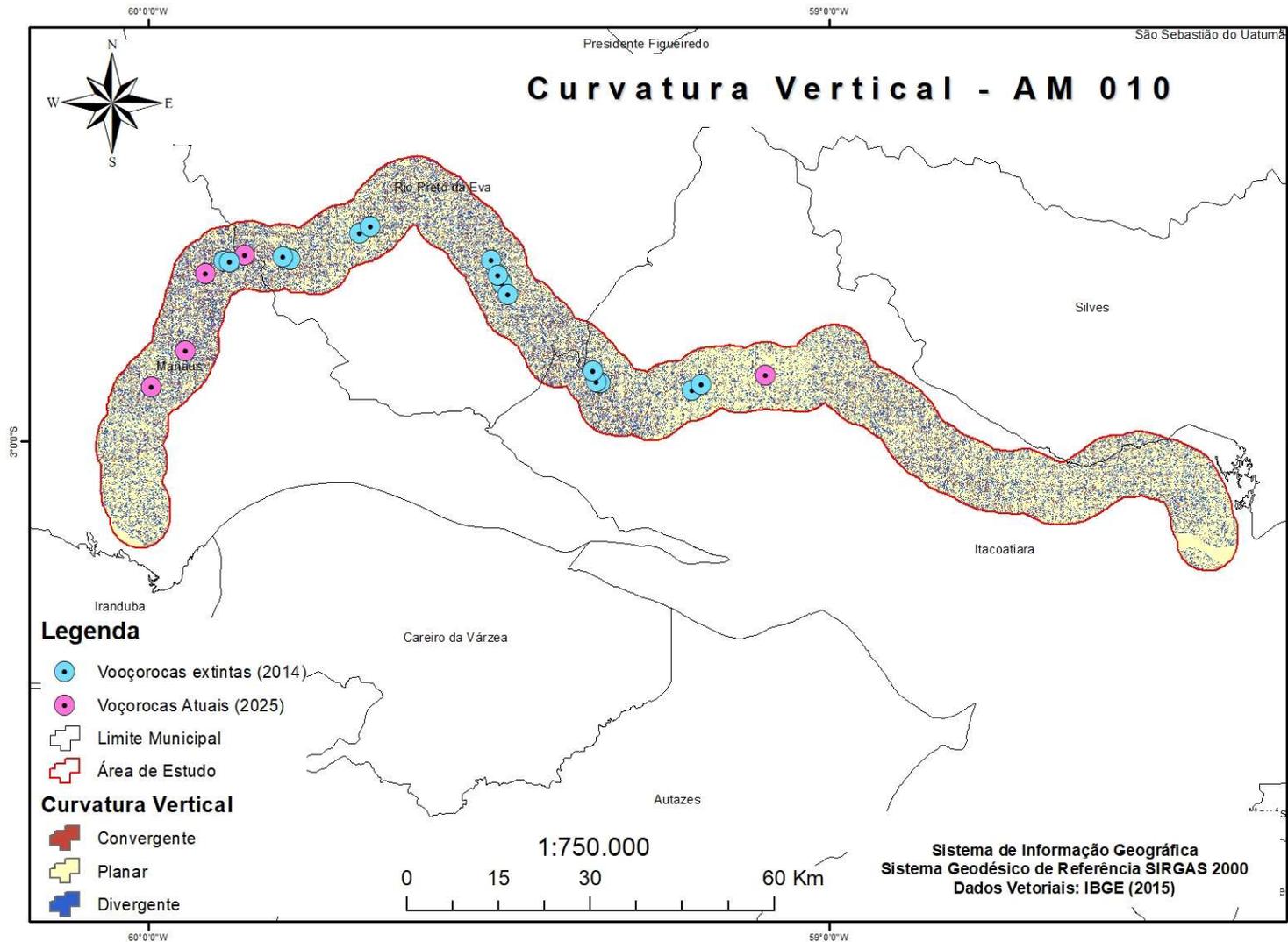
Org.: Anne Dirane, 2024.

Figura 45 - Perfil e direção do fluxo na vertente.



Fonte: adaptado de ESRI, 2014.

Figura 46 - Mapa de curvatura vertical, rodovia AM-010.



Org.: Anne Dirane, 2024.

A análise dos parcelamentos da topografia aponta a curvatura vertical das vertentes como uma das variáveis de alto poder de identificação de unidades homogêneas do relevo (Doornkamp; King, 1971).

A curvatura vertical (**figura 46**) diz respeito à forma convexa ou côncava do terreno quando analisado em um perfil. Essa variável é fundamental para entender os processos de escoamento e acúmulo de água, minerais e matéria orgânica no solo, que ocorrem na superfície sob a influência da gravidade (Caus, 2010).

6.8. Vulnerabilidade à perda de solo conforme adaptação Crepani (2001)

A elaboração do mapa de vulnerabilidade, se deu a partir de outros mapas, os quais tiveram seus pesos atribuídos de acordo com a metodologia Crepani (2001). Para comparação e análise da metodologia adaptada, foi confeccionado o mapa de vulnerabilidade a perda de solo da rodovia AM-010, com critérios onde buscou-se destacar, em cada um dos temas (Relevo, Índice Pluviométrico, Solos, Uso e Ocupação e Geologia parâmetros que se apresentam como indicadores de categoria dos processos morfodinâmicos.

O mapa de vulnerabilidade ambiental à erosão foi obtido a partir do cálculo de mapas das grades de vulnerabilidade, para os temas de relevo, clima, solos, uso e ocupação e geologia.

Conforme a equação adaptada de Crepani *et al.* (2001):

$$V = R + IP + S + UO + G / 5$$

Onde:

V= vulnerabilidade;

R = Vulnerabilidade para o relevo;

IP = Vulnerabilidade para Índice Pluviométrico;

S = Vulnerabilidade para Solos

UO = Vulnerabilidade para Uso e Ocupação da Terra

G = vulnerabilidade para Geologia;

Quadro 12 - Escala de vulnerabilidade á denudação das rochas na rodovia AM-010

VULNERABILIDADE	ROCHAS
1,0	Quartzitos ou metaquartzitos
1,1	Granito
1,2	Granodiorito
1,3	Gnaisses
1,5	Basalto
2,4	Arenitos quartzosos ou ortoquartzitos
2,7	Siltitos, Argilitos
2,8	Folhelhos
3,0	Sedimentos Inconsolidados: Aluviões, Colúvios etc

Fonte: Crepani (2001). Org. Anne C. M Dirane (2023).

Quadro 13 - Valores de vulnerabilidade/estabilidade para tipos de solos

VULNERABILIDADE	CLASSE DE SOLOS
1.0	Latossolo amarelo, Latossolo Vermelho
2,0	Planossolo
2,5	Cambissolo
3.0	Solos Aluviais, Plintossolo, Gleissolo, solos Hidromórficos, Solos concrecionários lateríticos

Fonte: Crepani et al., 200. Org. Anne C. M. Dirane (2023).

Quadro 14 - Grau de Vulnerabilidade para a classe de vegetação.

GRAU DE VULNERABILIDADE	CLASSE DE VEGETAÇÃO
1	Floresta Ombrófila Densa, Floresta Ombrófila Aberta
2,3	Vegetação lenhosa

Fonte: Crepani et al., 2001. Org. Anne C. M. Dirane (2023).

Quadro 15 - Vulnerabilidade a perda de solo para o índice pluviométrico

VULNERABILIDADE	INTENSIDADE PLUVIOMÉTRICA (mm/mês)
1,0	< 50
1,1	50 - 75
1,2	75 - 100
1,3	100 - 125
1,4	125 - 150
1,5	150 - 175
1,6	175 - 200
1,7	200 - 225
1,8	225 - 250
1,9	250 - 275
2,0	275 - 300
2,1	300 - 325
2,2	325 - 350
2,3	350 - 375
2,4	375 - 400
2,5	400 - 425
2,6	425 - 450
2,7	450 - 475
2,8	475 - 500

2,9	500 - 525
3.0	> 525

Fonte: Crepani *et al.*, 2001. Org. Anne C. M. Dirane (2023).

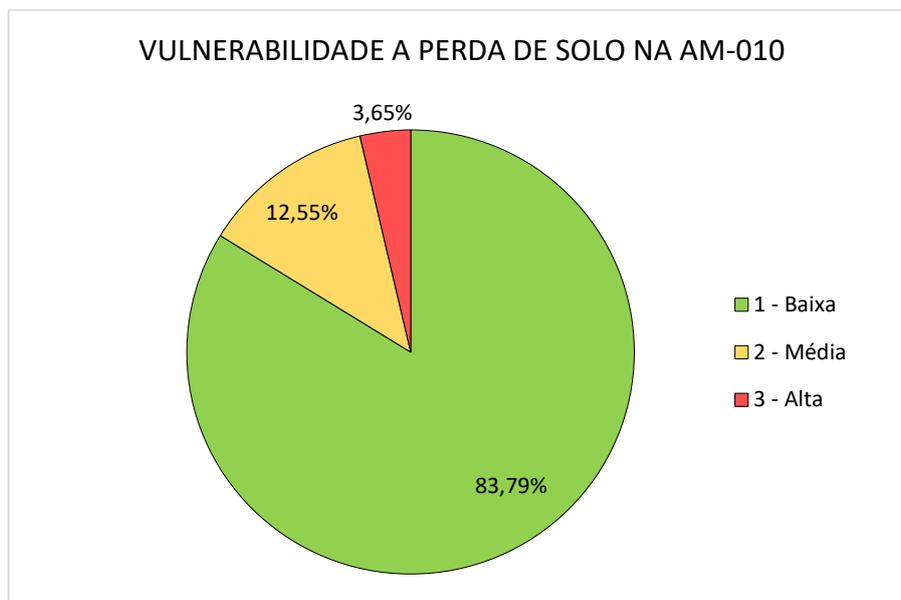
Quadro 16 - Vulnerabilidade para dissecação, amplitude altimétrica e declividade do relevo.

VULNERABILIDADE/E STABILIDADE	DECLIVIDADE (%)
1.0	<3,5
1,1	3,5 – 5,8
1,2	5,8 – 8,2
1,3	8,2 – 10,3
1,4	10,3 – 12,9
1,5	12,9 – 15,1
1,6	15,1 – 17,4
1,7	17,4 – 19,8
1,8	19,8 – 22,2
1,9	22,2 – 24,5
2,0	24,5 – 27,2
2,1	27,2 – 29,6
2,2	29,6 – 32,1
2,3	32,1 – 34,6
2,4	34,6 – 37,2
2,5	37,2 – 39,8
2.6	39,8 – 42,4
2,7	42,4 – 45,3
2,8	45,3 – 48,1
2,9	48,1 – 50
3.0	>50

Fonte: Crepani *et al.*, 2001. Org. Anne C. M. Dirane (2023).

O mapa de vulnerabilidade a perda de solo (**figura 47**) da rodovia AM-010, elaborado com a metodologia proposta por Crepani, com as voçorocas que foram mapeadas em 2014, resultou em vulnerabilidade muito baixa a perda de solos, 83,79 %, somente 3,65% da área considerada com alta vulnerabilidade, conforme **gráfico 01**.

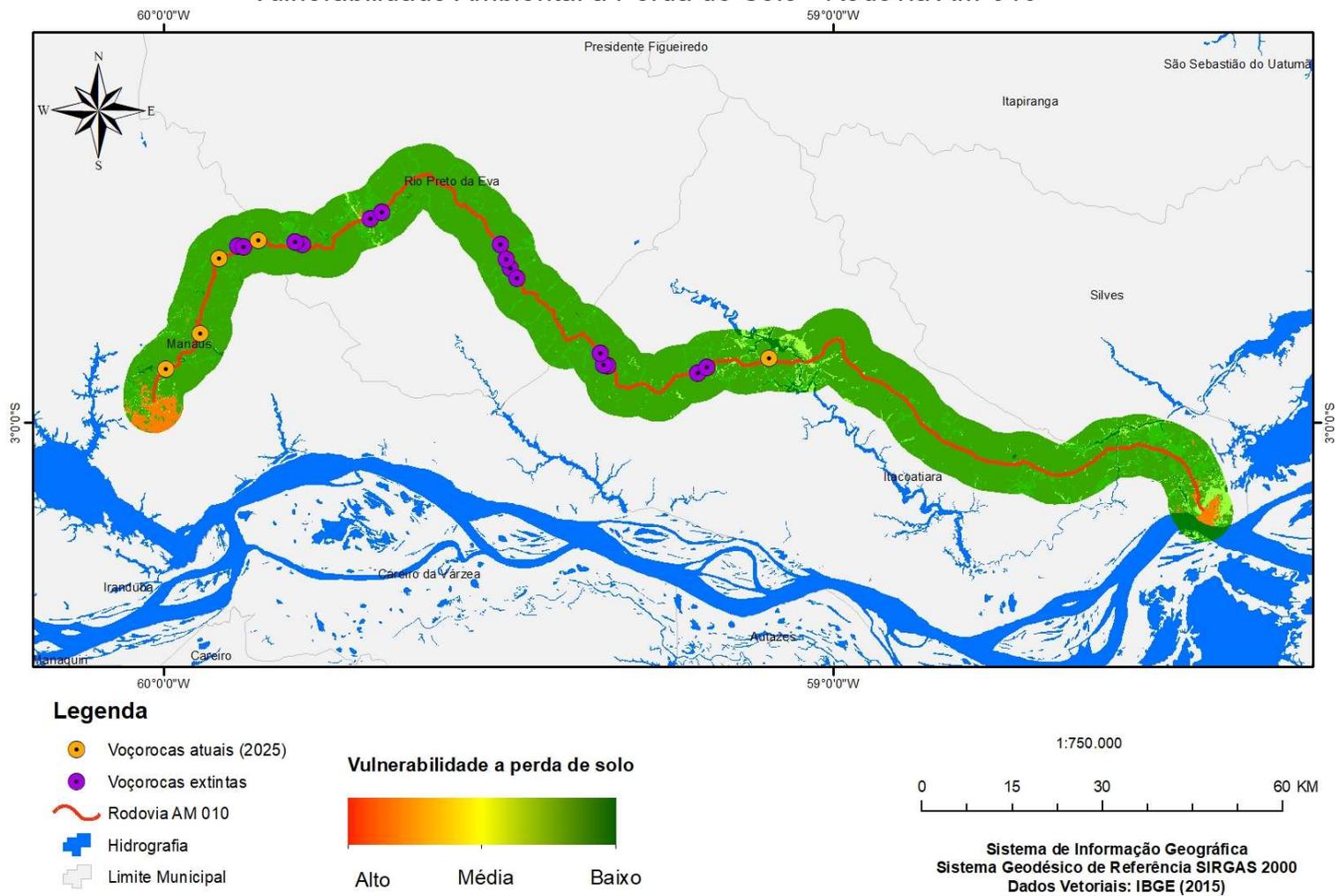
Gráfico 1 - Vulnerabilidade a perda de solo com metodologia proposta por Crepani (2001).



Org.: Anne Dirane, 2024.

Figura 47 - Vulnerabilidade ambiental a perda de solos na rodovia AM-010.

Vulnerabilidade Ambiental à Perda de Solo - Rodovia AM-010



Org.: Anne Dirane, 2025

Após a geração do mapa de vulnerabilidade (**figura 47**) e a inserção das voçorocas mapeadas no ano de 2014, (Dirane, 2016), constatou-se que a metodologia utilizada por Crepani (2001) não atendeu de forma satisfatória o mapeamento para vulnerabilidade na rodovia do AM-010, no Amazonas. No que diz respeito ao clima, os dados pluviométricos são importantes e necessários, mas precisam ser ajustados quanto aos pesos atribuídos e o tempo. Na metodologia proposta por Crepani, os valores utilizados para o índice pluviométrico e o período de coleta dessa variável é bem díspares, quando comparado com os dados obtidos na área de estudo em questão. O quantitativo de chuva é bem superior se comparado com a região analisada por ele e o período de chuvas também, se comparado com a dinâmica da região amazônica. No que diz respeito a variável para dissecação, amplitude altimétrica e declividade do relevo, no qual os dados são cruzados através de uma equação aritmética e é estabelecido a variável geomorfologia, utilizou-se somente os dados da declividade.

No que se refere a solo, que é um parâmetro para determinar a vulnerabilidade, Rodrigues *et al* (2017) afirmam, que um ambiente natural estável que favorece o processo de pedogênese, apresenta consequentemente solos mais desenvolvidos e intemperizados, enquanto que em um ambiente instável prevalece a denudação do relevo, tendo o predomínio de processos erosivos, portanto solos mais novos e inconsistentes.

Ainda sobre as variáveis e os parâmetros utilizados por Crepani (2001), a cobertura vegetal é a que protege o solo dos processos erosivos, sendo utilizada na integração com outros dados de variáveis.

O **quadro 17** apresenta a ordem das variáveis e os pesos atribuídos a cada uma delas, para a elaboração do mapa de vulnerabilidade à perda de solo.

Quadro 17 – Variáveis e pesos para o mapeamento da vulnerabilidade (proposta do autor)

Declividade (%)	Pesos
< 2	1
2 – 6	1,5
6 – 20	2
20 – 50	2,5
> 50	3
Pedologia - IBGE / 1:250.000	Pesos
Latossolo Amerelo	1
Neossolo Quartzarênico	3
Gleissolo Háptico	3
Plintossolo Háptico	3
Área Urbana	3
Corpos d'água	1
Uso da Terra - MapBiomias (2022)	Pesos
Formação Florestal	1
Formação Savânica	1
Floresta Alagável	1
Campo Alagado	1
Formação Campestre	2
Pastagem	3
Área Urbana	3
Mineração	3
Corpos d'água	1
Outras lavouras temporárias	2,7
Erosividade Ano (INMET)	Pesos
R < 2.500	1,0
2.500 < R < 5.000	1,5
5.000 < R < 7.000	2,0
7.000 < R < 10.000	2,5
R > 10.000	3,0
Geologia - IBGE / 1:250.000	Pesos
Formação Alter do Chão	2
Aluviões Holocênicos	3
Cobertura Dentrito-Laterítica Paleogênica	2
Terraços Holocênicos	1

Org.: Anne Dirane, 2024.

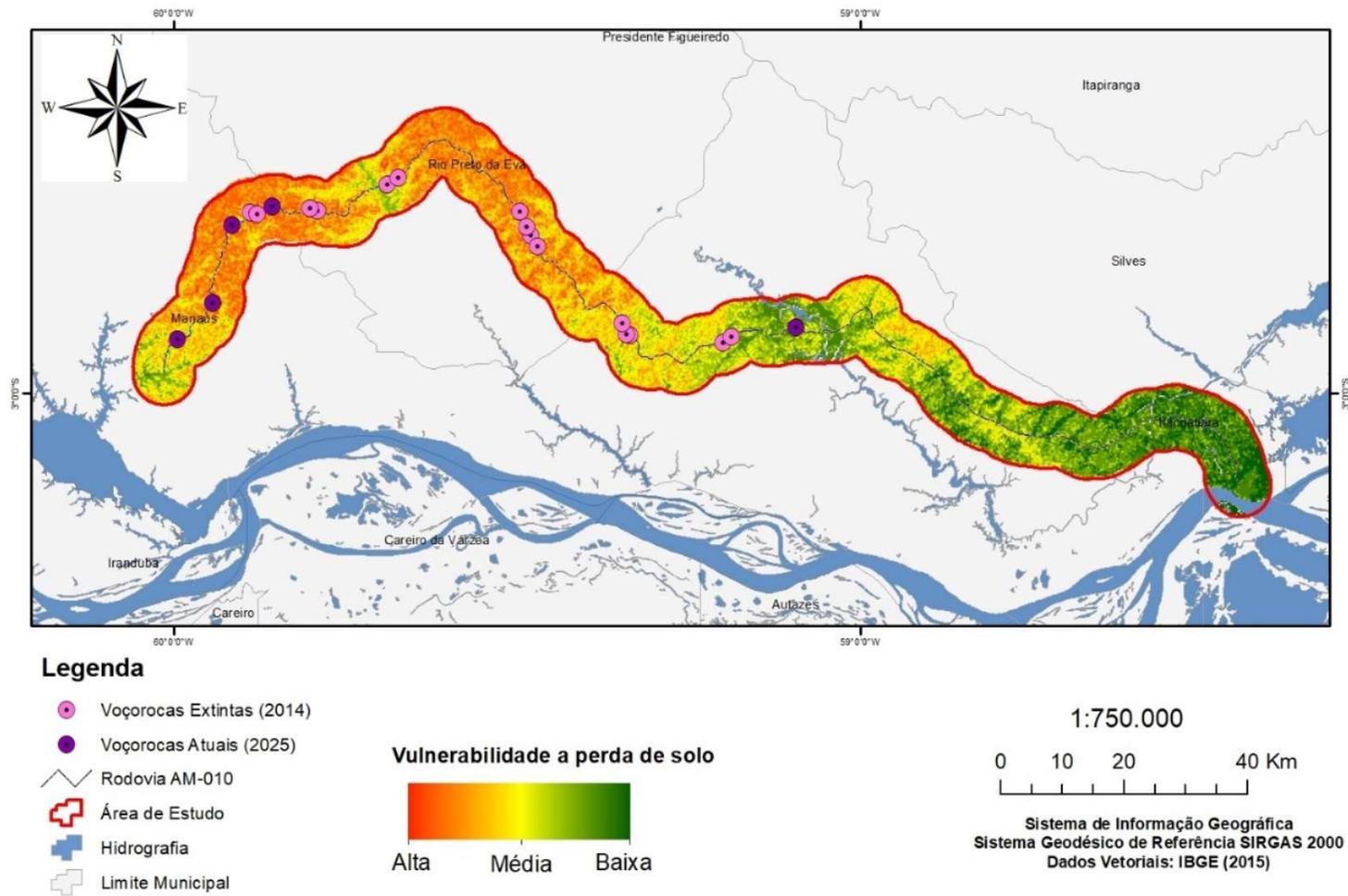
Compreender o ambiente em sua totalidade a partir das análises integradas evidencia o destaque para a geografia, a partir dos aspectos físico-bióticos e da multiplicidade de atividades e intervenções promovidas pela sociedade nas diferentes paisagens Ab'Saber (1994). Na visão de Ab'Saber, a paisagem é entendida como um

suporte físico, ecológico e bioecológico, que resulta da interação entre leis físico-geográficas gerais e características locais.

A **figura 48** representa a vulnerabilidade ambiental á perda de solo elaborado a partir da adaptação metodológica e Crepani (2001), que viabiliza um mapeamento considerando as características da região e a atribuição de pesos às vulneráveis que influenciam e condicionam a perda de solo na rodovia AM-010.

Figura 48 – Mapeamento da vulnerabilidade ambiental à perda de solo da rodovia AM-010 (Adaptada)

Vulnerabilidade Ambiental à Perda de Solo - Rodovia AM-010

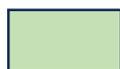


Org.: Anne Dirane, 2024.

A paisagem é constantemente alterada e influenciada pelas atividades antropogênicas, refletindo a dinâmica entre os elementos naturais e as intervenções humanas. Em vista disso, se fez necessário algumas adequações e ajustes para o mapeamento da vulnerabilidade à perda de solo. A metodologia proposta no trabalho adotou as vulneráveis de declividade, índice pluviométrico, altimetria, uso e ocupação da terra e solos (**quadro 18**).

Quadro 18 – Variáveis e pesos utilizados no mapeamento da vulnerabilidade

Classe da Vulnerabilidade	Declividade	Intensidade pluviométrica (mm/ano)	Uso e ocupação da terra	Solos	Geologia
1	0 – 8	1800 - 2230	Formação Florestal	Corpos d'água	Terraços Holocênicos
2	08 – 20	2230 - 2560	Formação Campestre	Latossolos	Formação Alter do Chão Cobertura Dentrito-Laterítica Paleogênica
3	20 > 45	>2800	Área Urbana	Neossolo/Gleissolo/Plintossolo	Aluviões Holocênicos

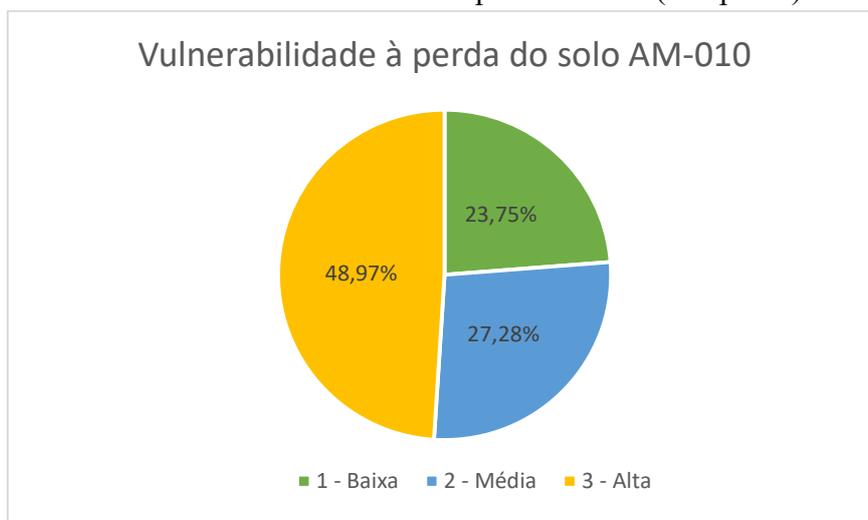


Classes de variáveis predominantes na rodovia Am-010.

Org.: Anne Dirane, 2024.

O **gráfico 2** representa a porcentagem das áreas vulneráveis à perda de solo, onde baixa vulnerabilidade à perda de solo corresponde há 23,75%, a média vulnerabilidade totalizando 27,28% e a alta vulnerabilidade com 48,97% da rodovia.

Gráfico 2 -Vulnerabilidade à perda de solo (Adaptado)



Org.: Anne Dirane, 2024.

A declividade é uma valiosa variável morfométrica do relevo, juntamente com a hipsometria são indispensáveis na análise de vulnerabilidade da vertente. Quanto maior a declividade do terreno, mais intensa é a velocidade e potencial para o transporte de águas pluviais, deixando-o mais propenso para o processo erosivo do solo (Lira; Francisco; Feiden, 2022).

A pluviometria por sua vez, é uma importante variável a ser considerada nas análises de vulnerabilidade ambiental, sobretudo, a variável pluviometria que interfere diretamente na capacidade de erodibilidade hídrica de uma determinada área.

A hipsometria, diferente de Crepani (2001), é uma variável com autonomia, sendo o peso atribuído de forma individualizada, não em conjunto com a declividade e a dissecação.

A variável uso e ocupação da terra foi definida de acordo com as classes identificadas, sendo a variável com menor peso a formação florestal e a de maior peso, área urbana.

Em relação aos solos, a ocorrência dos latossolos predomina, sobretudo em relevos planos, preponderando a morfogênese. Para Tavares, Romão e Oliveira (2020) os Latossolos são solos bem desenvolvidos, profundos e bem estruturados, com predomínio de agregações, sendo considerados solos mais maduros, cuja porosidade é alta. O uso do solo para a ocupação antrópica e atendimento das necessidades humanas acaba propiciando sua degradação e potencializando o processo erosivo na vertente.

Os neossolos possuem características de solos jovens e arenosos, com pouca capacidade de reter água, sendo vulnerável à erosão e com baixa aptidão agrícola (Tavares, Romão; Oliveira, 2020). Os Planossolos, possuem horizontes mais arenosos e permeáveis, os quais mudam abruptamente para um horizonte compactado e mais argiloso com permeabilidade muito baixa (Saraiva *et al.*, 2021)

Para a construção da rodovia AM-010, o solo foi bastante degradado, sem os devidos cuidados e recuperação. Em muito trechos o solo foi removido e depositado em outro segmento da mesma rodovia. Na reconstrução, foram adotadas algumas medidas de terraceamento e hidrossemeadura, no entanto, em muitos quilômetros o solo encontra-se exposto, sobretudo o solo que foi removido e depositado em outro trecho, deixando-o mais instável. De acordo com Pellogia (1998), esse cenário indica a transformação urbana mais intensa provocada pelo homem como agente geológico, criando áreas artificiais, depósitos tecnogênicos como assoreamento e processos correlatos de erosão e

escorregamento denominados antrópicos ou geotecnogênicos (**figura 49**). Vitorino (2016) afirma que os terrenos tecnogênicos são produzidos pelo homem, resultando da mobilização ou transformação in situ de materiais constituintes do manto de intemperismo, do solo superficial, do substrato rochoso ou de depósitos sedimentares.

Figura 49 – Depósito tecnogênico ao longo da rodovia AM-010.



Fonte: Anne Dirane, 2024.

Nesse sentido, a análise isolada das variáveis, a fim de identificar as que mais se adequam para a obtenção da vulnerabilidade a processos erosivos e análise correlacionadas com pesquisas anteriores na rodovia, as variáveis foram selecionadas e atribuídos os devidos pesos. Para a metodologia proposta para esse trabalho, a variável geologia foi substituída pela hipsometria e os peso da variável intensidade pluviométrica ganhou mais importância, por conta do volume de chuva na região. Para obtenção desse dado, a utilização da imagem de satélite CHIRPS respondeu de forma satisfatória. A estruturação de variáveis e de pesos criou uma nova organização, como a de solos, que em decorrência da distribuição na área de estudo e na própria região amazônica teve ajustes nos pesos e na ordem de importância.

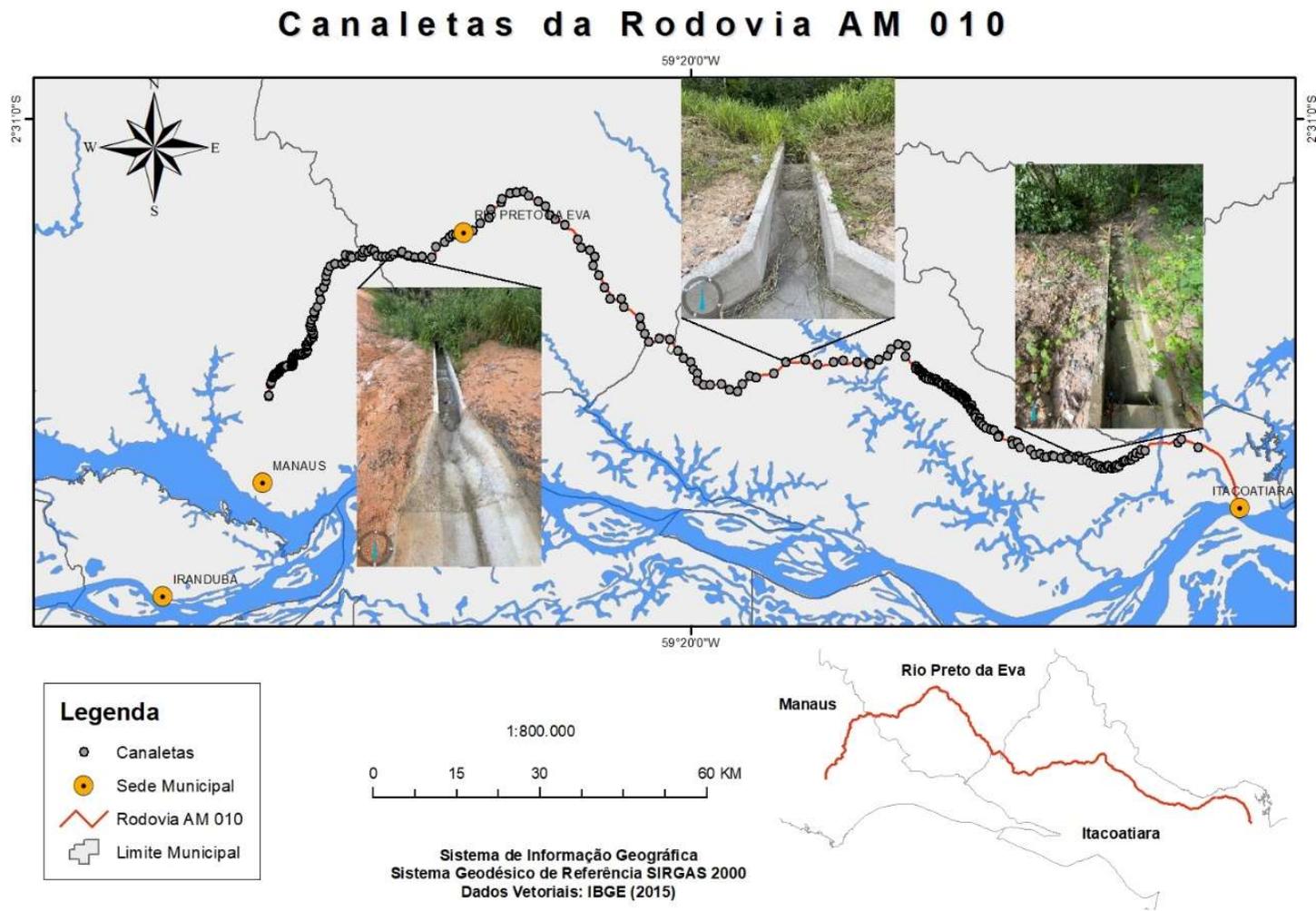
O mapa de vulnerabilidade a processos erosivos gerado a partir a metodologia proposta pela autora teve resposta bem satisfatória, evidenciando as áreas mais vulneráveis a processos erosivos e reiterando a contribuição de alguns fatores que contribuem e intensificam o processo. Como forma de validação da proposta

metodológica, foram utilizados os dados do mapeamento das voçorocas obtidos em 2014, sobrepondo as incisões erosivas no mapeamento gerado e sempre analisando à luz das observações feitas em campo. As 15 voçorocas mapeadas no ano de 2014, as voçorocas remanescentes, do km 104 e as 05 cadastradas em 2025 estão inseridas nas áreas identificadas como vulnerabilidade alta, e se concentram nas áreas aonde o relevo possui declividade de suave a ondulado, o uso e ocupação da terra, sem a formação florestal e o tipo de solo é o latossolo.

Mapeamento das Canaletas

Para o mapeamento das canaletas (**Figura 50**), foi utilizado a ficha cadastral (anexo), contendo informações acerca da margem em que a mesma se encontra. Foram mapeadas 315 canaletas, com diferentes tipos estruturas. O objetivo das canaletas é captar a água precipitada na rodovia e no talude, direcionando-as para o local de desembocadura adequado.

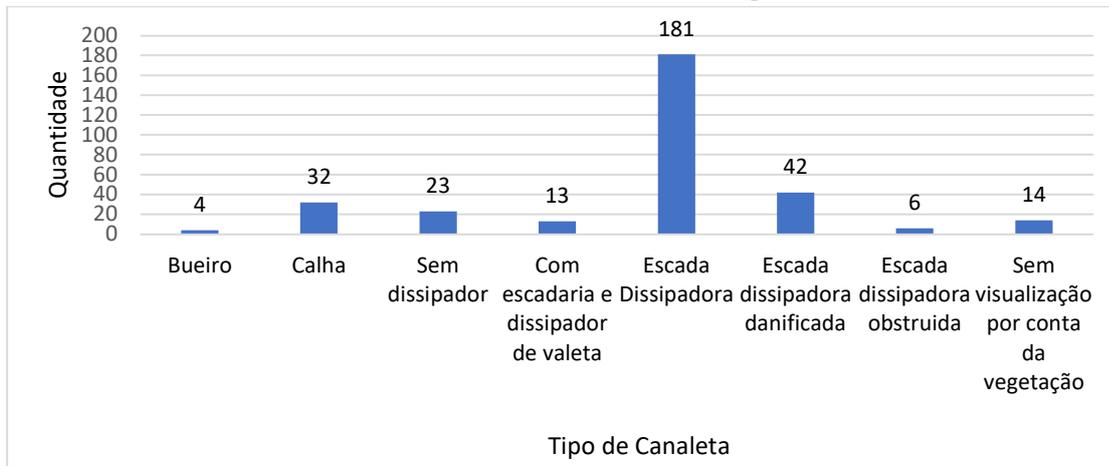
Figura 50 - Canaletas presentes na rodovia AM-010/Amazonas.



Org.: Anne Dirane, 2025.

O **gráfico 3** mostra os tipos de canaletas identificados na rodovia AM-010. Canaletas com escada dissipadora foi o tipo mais comum, sendo registradas 181, principalmente nos trechos da rodovia em que as obras foram concluídas recentemente. Foram identificadas canaletas com escada dissipadora danificadas (n=42), dado que corrobora para análise do início do processo erosivo nas vertentes, uma vez que o escoamento concentrado pode extrapolar para além da canaleta, provocando o início de sulcos que acompanham a extensão da drenagem.

Gráfico 3 – Característica da drenagem artificial



Org.: Anne Dirane, 2025.

As canaletas mapeadas (**figura 50**) encontradas em maior quantidade, são as canaletas com dissipadores de energia do tipo escadaria, onde a finalidade é reduzir a velocidade do fluxo, diminuindo o impacto da água no solo e evitando o processo erosivo, no contato da água com porção final da drenagem (saídas de água). Outro tipo comum encontrados na rodovia, são as canaletas sem dissipadores, que levam o fluxo direto e com muita vazão para o solo. Essas canaletas estão localizadas nas áreas aonde a vertente não ultrapassa 8 m de comprimento (**Figura 51**).

Figura 51 - Principais tipos de canaletas encontradas na rodovia AM-010/Amazonas.



A) Canaleta sem escadaria; B) Canaleta com escadaria.

B) Fonte: Anne Dirane, 2025.

A maior concentração de canaletas está localizada na margem direita da rodovia (sentido Manaus – Itacoatiara), totalizando 179 e 127 na margem esquerda. A disposição das canaletas em rodovias, depende de alguns fatores, como as características do terreno, o projeto e os recursos empregados para a obra. No caso da rodovia AM-010, que condiciona a predominância de canaletas do lado direito é o direcionamento das águas pluviais (**figura 52**), que são captadas da pista para evitar alagamentos. Outro fator é a inclinação da pista, que no caso da rodovia mencionada, possui uma inclinação lateral maior para a margem direita.

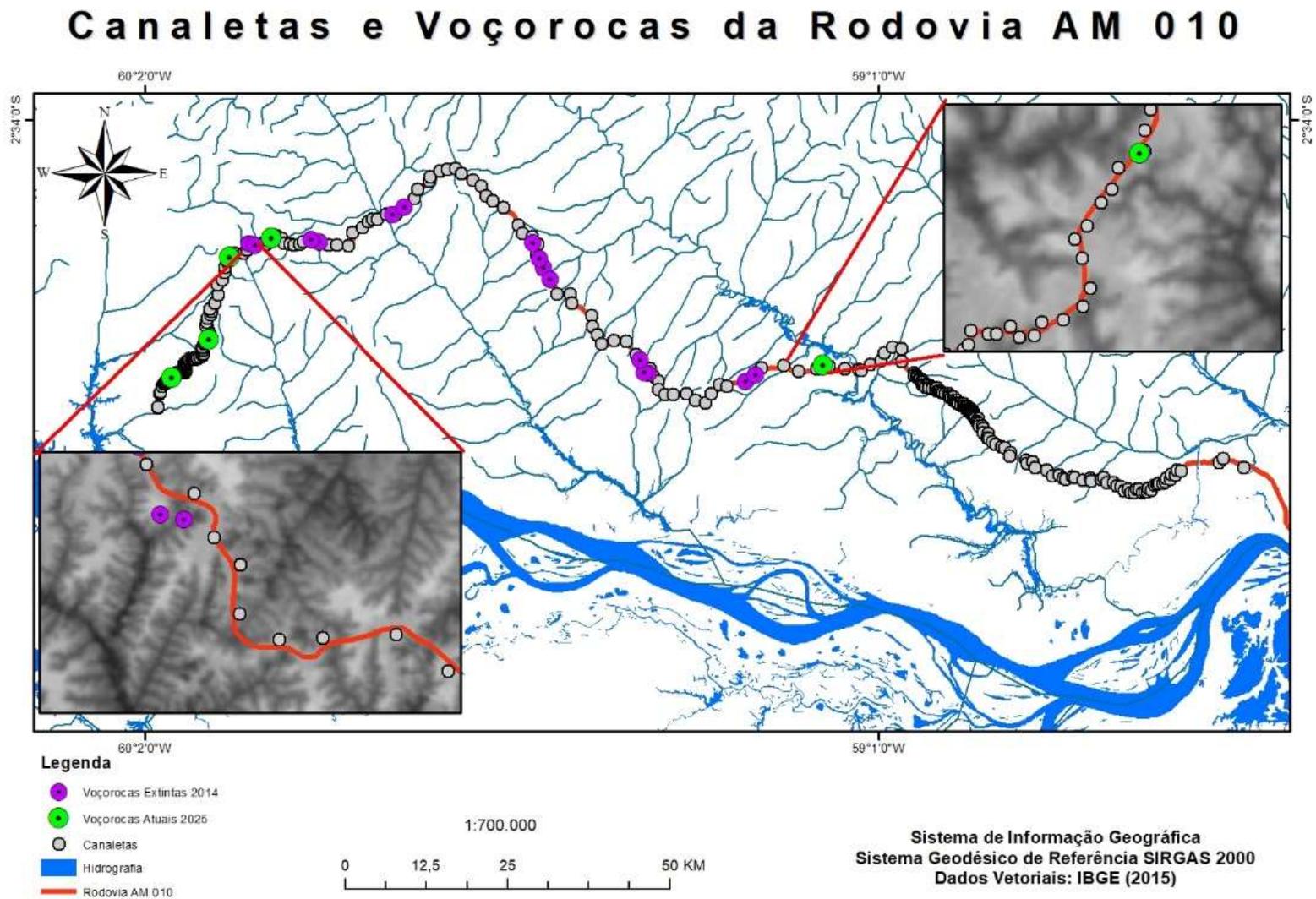
Figura 52– Captação da água da chuva para canaleta, Am-010/Amazonas.



Fonte: Anne Dirane, 2025.

Quando a rodovia foi construída, na década de 50, foi considerada a topografia local, e que com o tempo, foi sendo suavizado alguns trechos com as constantes obras executadas nesta. Atualmente (2025), a rodovia encontra-se em obras, com muitos trechos alterados. De acordo com a **figura 53**, a rodovia segue em boa parte o relevo natural, e por conta da sua inclinação maior do lado direito, acabou direcionando a construção da maioria das canaletas para esse lado.

Figura 53 – Distribuição das canaletas e das voçorocas na rodovia AM-010/Amazonas.

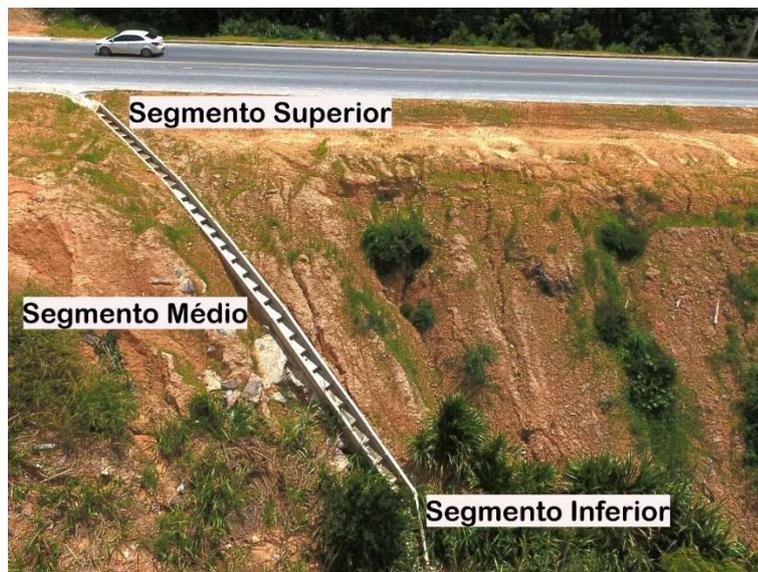


Org.: Anne Dirane, 2025.

No que diz respeito a posição na encosta, todas as canaletas tem sua entrada no segmento superior do talude, o que corresponde a 33 estruturas (10,5%) tem sua estrutura restrita a esse segmento. Porém, 201 se estendem da porção superior até a porção média (63,8%) e 81 (25,7%) canaletas ocupam toda a extensão do talude (porção superior à porção inferior) (**figura 53**).

O fato na canaleta não seguir do início até o fim do talude, contribui para o surgimento do início do processo erosivo ao final da estrutura no contato direto com o solo, visto que a água despejada no solo de forma abrupta conduz a um desgaste maior deste.

Figura 54 – Disposição das canaletas na vertente, AM-010/Amazonas.



Org.: Anne Dirane, 2025.

É importante ressaltar que a muitas canaletas apresentam algum tipo de dano estrutural, com fissuras, rachaduras ou mesmo quebradas, o que possibilita a formação de fluxos laterais externos, dando origem a sulcos, que muitas vezes são profundos e paralelos a canaleta (**Figura 54**).

Figura 55 – Rupturas nas canaletas, AM-010/Amazonas.



Fonte.: Anne Dirane, 2025.

Quanto maior a declividade da vertente, maior a possibilidade de ocorrer fratura da canaleta, o que pode provocar, conforme já mencionado a formação de sulcos paralelos que vão escavando a estrutura da canaleta, tirando sua sustentação e possibilitando a evolução do sulco para uma ravina, o que por sua vez pode continuar evoluindo para uma voçoroca.

Em muitos trechos da rodovia, é comum a presença de aterros que utiliza o solo próximo como matéria prima para essa prática, todavia, quando esse material não é devidamente compactado e protegido por vegetação (gramíneas, por exemplo), pode ser facilmente erodido e formar feições erosivas diversas (sulcos, ravinas e até mesmo voçorocas) ou simplesmente ser desgastado pela ação da água corrente (**Figura 55**).

Figura 56 – Depósito inconsolidado na rodovia AM-010/Amazonas.



Fonte.: Anne Dirane, 2025.

Positivamente, percebeu-se que um grande número de canaletas (n=154), o que corresponde a 49% do total, tem ao redor destas uma superfície revestida de vegetação, o que de certa forma, as protege contra ação dos pingos das chuvas e dos escoamentos. Um outro grupo de canaletas (n=97), o que corresponde a 31%, tem no seu entorno, solo exposto, o que dependendo da declividade do talude, pode contribuir para a formação de incisões erosivas e perda maior de solo pela erosão. A esse respeito, verificou-se que todas que se encaixavam nesse grupo, apresentam sulcos rasos e/ou profundos. Por fim, tem-se as canaletas com a superfície parcialmente exposta, portanto, com pouco cobertura vegetal (n=64), correspondendo a 20% do total. Esta tem mais potencial de ampliação dos processos erosivos quando comparadas com a superfície completamente coberta por vegetação.

7. CONCLUSÃO

A erosão dos solos é um problema crescente e pesquisas ao redor do mundo indicam que os solos estão bastante degradados e o principal fator é o processo erosivo acelerado. A mudança no uso da terra tem colaborado muito com esse cenário. A erosão gera impactos significativos, tanto no âmbito ambiental, bem como no social. No que tange o ambiente natural, a degradação por erosões pode destruir diversos habitats, resultando na diminuição da diversidade de plantas e animais que pertencem a esse nicho, assim como desbalancear essas espécies.

A mudança na qualidade do solo causada pela erosão pode desencadear problemas, como a redução da vegetação, que afeta a vida animal, a capacidade de produção, danos que podem afetar a sociedade e o desequilíbrio ambiental. A prática da conservação do solo e seu manejo de forma sustentável se fazem cada vez mais necessários, sobretudo em ambientes urbanos.

É comum a ocorrência de voçorocas ao longo das margens de rodovias, e danos decorrentes da erosão. A pesquisa adaptou uma metodologia para identificação de áreas vulneráveis a processos erosivos, com intuito de responder aos questionamentos acerca da origem e desenvolvimento dessas erosões. O geoprocessamento é uma ferramenta de grande relevância na utilização da metodologia utilizada no trabalho.

O trabalho de campo na rodovia AM-010 evidenciou a extinção de 14 voçorocas, do total de 15, que foram mapeadas no ano de 2014. A inexistência das incisões se deu em decorrência da reconstrução da rodovia, que apresentava somente uma voçoroca remanescente localizadas nos km 104 (ativa). Em 2025, no trabalho de cadastramento das canaletas presentes na rodovia, foram cadastradas 5 voçorocas, que surgiram em um intervalo de 10 meses.

Para entender os condicionantes formadores de voçorocas, foi necessário adaptar uma proposta metodológica, para análise da vulnerabilidade, que consiste na verificação de variáveis que se adequem a realidade da região.

O ambiente de SIG tem auxiliado em muitos aspectos as pesquisas relacionadas ao ambiente natural, fazendo diagnósticos ambientais através de modelos matemáticos que são desenvolvidos, analisados e aplicados, tendo suporte de programas computacionais. Atualmente a análise e o diagnóstico de muitos problemas ambientais, inclusive o de

perda de solos, podem ser analisados e discutidos em diversas escalas e atenuados de acordo com suas necessidades.

Foram utilizados produtos do sensoriamento remoto para elaboração dos mapas de relevo (SRTM) e para os dados pluviométricos (CHIRPS), que responderam de forma eficaz, que as áreas com declividade de 08 – 20% são predominantes, a intensidade pluviométrica em média é 2500 mm/ano, com a formação florestal prevalecendo sobre as demais classes, no que diz respeito ao uso e cobertura do solo e o latossolo é a classe de solo preponderante ao longo da rodovia. Essas informações obtidas em cada tema foram analisadas e atribuídos pesos, além de uma hierarquia das variáveis. A tese se confirma a partir da elaboração do mapa de vulnerabilidade ambiental à processos erosivos, evidenciando a ocorrência de áreas com alta vulnerabilidade.

Ao comparar o mapeamento da vulnerabilidade ambiental com o mapeamento das voçorocas, é notório que as mesmas estão localizadas nas áreas com alta vulnerabilidade, que são os trechos da rodovia com predomínio da morfogênese e elevado grau de processo de erosivos. É possível afirmar também, que as áreas em que o solo foi removido e depositado em outros segmentos da rodovia para a formação de aterros e a presença de canaletas, derivadas das ações de infraestrutura desencadeiam o processo erosivo do tipo voçorocamento.

O geoprocessamento e o mapeamento da vulnerabilidade à perda de solo são ferramentas cruciais para assegurar práticas de manejo sustentável, proteger a qualidade do solo e promover a resiliência dos ecossistemas frente a pressões ambientais e antropogênicas.

8. REFERÊNCIAS

AB'SABER, A. N. Bases conceituais e papel do conhecimento na previsão de impactos. In: MULLER-PLANTENBERG, G; AB'SABER, A. N. (org.). **Previsão de Impactos: o estudo de impacto ambiental no leste, oeste e sul. Experiências no Brasil, na Rússia e na Alemanha.** São Paulo: Edusp, 1994.

ADGER, W. N. Vulnerability. **Global Environmental Change.** v. 16 p.268 - 281. 2006.

AFFONSO, C. H. A.; FREITAS, L. G. B. Implantação e manejo de gramíneas em estradas e rodovias. In: SIGRA – Simpósio Sobre Gramados: “Produção, implantação e manutenção”, 1.,2003, São Paulo. **Anais[...].** São Paulo: Universidade Estadual Paulista, 2003.

ALEXANDER, D. **Desastres Naturais.** Nova York: Chapman & Hall, 1993.

ALMEIDA, L. Q. Por uma ciência dos riscos e vulnerabilidades na geografia. **Mercator,** Fortaleza, v. 10, n. 23, p. 83-99, set./dez. 2011.

ALMEIDA, F. G. de; GUERRA, Antônio José Teixeira. Erosão dos Solos e Impactos Ambientais na Cidade de Sorriso (Mato Grosso). In: GUERRA, Antônio José Teixeira; DA CUNHA, Sandra Baptista. **Impactos Ambientais Urbanos no Brasil.** 6. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2010. p. 253-274.

ARAÚJO, A. G. S. **Morfodinâmica fluvial do rio Amazonas entre a ilha do Careiro e a Costa do Varre Vento – AM.** 2018, 130 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal do Amazonas.

AMAZONAS. **Perfil da região Metropolitana de Manaus.** 1ª Edição - Ano base 2014.

ANA (Brasil). **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil.** Brasília: Agência Nacional de Águas, 2009. 203 p.

ANEEL (Brasil). **Série de estudos e informações hidrológicas e energéticas: Águas.** Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica, 1997.

ARNESEN, A. S; GENOFRE, F. T; CURTARELLI, M. P. Análise da vulnerabilidade à erosão através de SIG: um subsídio ao zoneamento ecológico-econômico de Santo Amaro da Imperatriz/SC. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 18.,2009. **Anais[...].**Campo Grande, MS, 2009.

BIRKMANN, J. (org.) **Measuring Vulnerability to Natural Hazards: Towards disaster resilient societies.** Tóquio; Nova York: United Nations University Press, 2006. 524 p.

BOTSCHEK, J. *et al.* Soil chemical properties of a toposequence under primary rain forest in the Itacoatiara vicinity (Amazonas, Brazil). **Geoderma, Amsterdam,** v. 72, n. 1-2, p. 119-132, 1996.

CANNON, T; TWIGG, J; ROWELL, J. **Social Vulnerability, Sustainable Livelihoods and Disasters**. Department for International Development, 2003. 63 p.

CARVALHO, D. P. **Ocorrência de voçorocas (gullies) na rodovia BR 174, trecho Manaus-Presidente Figueiredo (Am): gênese, morfologia e previsão de riscos**. 2017. 135 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2017. Disponível em: <https://tede.ufam.edu.br/handle/tede/5781#preview-link0>. Acesso em: 14/03/2022.

CASIMIRO, P. C. Uso do Solo - Ecologia da Paisagem: Perspectivas de uma abordagem do estudo da paisagem em Geografia. **Revista GeoInova**, Lisboa, n. 2, 2000, p.45-66.

COELHO, J. O. M; CARVALHO, D. N; SUGIMOTO, D. S; ZAINÉ, J. E; REIS, F. A. G. V. A abordagem do meio físico e a delimitação de áreas de influência em Estudos de Impacto Ambiental de obras rodoviárias no Estado de São Paulo. *In*: Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, 14,2013. **Anais[...]**.Rio de Janeiro: ABGE. 2013. 1 CD-ROM.

COMFORT, L. *et al.* Reframing disaster policy: the global evolution of vulnerable communities. **Global Environmental Change Part B: Environmental Hazards**, v.1, n.1, p. 39–44. Disponível: [https://doi.org/10.1016/S1464-2867\(99\)00005-4](https://doi.org/10.1016/S1464-2867(99)00005-4). Acesso em: 16 fev. 2024.

ALMEIDA, F. F. M. de (Coord.). **Tectonic Map of South America: 1:5.000.000: explanatory note**. Brasília: DNPM; CGMW; UNESCO, 1978.

CAUS, F. M. **Proposta de análise empírica da instabilidade potencial do relevo em estudos integrados**. 290 f. 2010. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal do Espírito Santo, 2010.

CAPUTO, M. V.; RODRIGUES, R.; VASCONCELOS, DJALMA N.N. Nomenclatura estratigráfica da Bacia do Amazonas: histórico e atualização. *In*: Congresso Brasileiro de Geologia. 26. 1972, p. **Anais [...]**. Belém, Pará, 1972. p. 35-46.

CORDANI, U. G. **Tectonic Map of South America: 1:5.000.000: explanatory note**. Paris:Commission for the Geological Map of the World.

COSTANZA, R. *et al.* The value of the world's ecosystem services and natural capital. **Nature** v.387, p.253-260, 1997.

CUNHA, J. M. P. Um sentido para a vulnerabilidade sociodemográfica nas metrópoles paulistas. **Revista Brasileira de Estudos Populacionais**, Campinas, v.21, n.2, p.343 – 347, jul.-dez., 2004.

CUTTER, S. L. “Vulnerability to environmental hazards”. **Progress in Human Geography**, Thousand Oaks, CA, v. 20, n. 4, p. 529-539, 1996.

CUTTER, S.L. Vulnerabilidade a riscos ambientais. **Progresso na Geografia Humana**, v. 20, n.4, p. 529-539, 1996.

CUTTER, S. L.; BORUFF, B. J.; SHIRLEY, W. L.; Social vulnerability to environment hazards. **Social Science Quarterly**, v.84, n.2, 2003. p. 242-261.

CUTTER, S. L. A ciência da vulnerabilidade: modelos, métodos e indicadores, **Revista Crítica de Ciências Sociais** v. 93,2011.

CREPANI, E; MEDEIROS, J. S.; PALMEIRA, A. F.; SILVA, E. F. “Zoneamento Ecológico Econômico”. *In*: Florenzano, T.G (org.). **Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008, p. 285-318.

CREPANI, E; MEDEIROS, J. S.; PALMEIRA, A. F. **Intensidade pluviométrica: uma maneira de tratar dados pluviométricos para análise da vulnerabilidade de paisagens à perda de solo**. São José dos Campos: INPE, 2004. 30p.

CREPANI, E; MEDEIROS, J, S; HERNANDEZ FILHO, P; FLORENZANO, T. G; DUARTE, V; BARBOSA, C. F. **Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicado ao zoneamento ecológico-econômico e ao ordenamento territorial**. São José dos Campos: INPE, 2001.

CREPANI, E; MEDEIROS, J. S; HERNANDEZ FILHO, P.; FLORENZANO, T. G; DUARTE, V; BARBOSA, C. C. F. **Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao Zoneamento Ecológico-Econômico e ao ordenamento territorial**. São Jose dos Campos: INPE, 2011.

CREPANI, E; MEDEIROS, J.S; L.G.; AZEVEDO, L.G; HERNANDEZ FILHO, P; FLORENZANO, T.G; DUARTE, V. **Curso de sensoriamento remoto aplicado ao zoneamento Ecológico- Econômico**. São José dos Campos. INPE, 1996. 26p.

D’AVILA JUNIOR, J. C. M; VIEIA, A. F. S.G. Padrões pluviométricos da cidade de Manaus-AM: 1986 a 2015. **Boletim Paulista de Geografia**, v.1 n. 102, p. 1-31, 2020. Disponível em: <https://publicacoes.agb.org.br/boletim-paulista/article/view/1508>. Acesso em: 20 fev.2024.

DAEMON, R. F. Contribuição à datação da Formação Alter do Chão, bacia do Amazonas. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 5, n. 2, p. 78-84, 1975.

DIRANE, A. C. M. **Mapeamento das áreas de risco a voçorocamento e caracterização geoambiental da rodovia Am-010 Manaus/Itacoatiara - Am**. 2016. 106 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2016.

DOORNKAMP, J. and King, C. **Numerical Analysis in Geomorphology: An Introduction**. Edward Arnold, London, 1971.

ESTEVES, C. J. de O. Risco e vulnerabilidade socioambiental: aspectos conceituais. **Caderno IPARDES**, Curitiba, v.1, n.2, p.-62-79, 2011.

FACHETTI, F. J. S.; COSTA, A. C. D.; SILVA, C. H. Magmatismo cálcio-alcalino Calimiano no embasamento do Terreno Jauru (Província Rondoniana - San Ignácio), Cráton Amazônico: geoquímica e geocronologia Sm-Nd E U/Pb. **Brazilian Journal of Geology**, v.46, n.1, p.109 - 128, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/2317-4889201620150008>. Acesso em: 06 mar. 2024.

FARIA, T. O; VECCHIATO, A. B; SALOMÃO, F. X. T; SANTOS JÚNIOR, W. A. Abordagem morfopedológica para diagnóstico e controle de processos erosivos. **Revista Ambiente & Água**, v. 8, n. 2, p.215-232 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1007>. Acesso em: 06 mar.2024

FERNANDES, N. F. *et al.* Topographic controls of landslides in Rio de Janeiro: field evidence and modeling. **Catena: interdisciplinary journal of Soil Science**. n. 55, v. 2, p. 163 – 181, 2004.

FISCH, G; MARENGO, J. A; NOBRE, C. A. Uma revisão geral sobre o clima da Amazônia. In: **Acta Amazônica** v. 28, n. 2, p. 101-126, 1998. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1809-43921998282126>. Acesso em: 12 jul. 2024.

FIGUEROA, S. N.; NOBRE, C. A. Precipitation distribution over Central and Western Tropical South América. **Climanálise: Boletim Monitoramento e Análise Climática**. v.5, n.6, p.36-45. 1990.

FONSECA, W.; BITAR, O. Y. Critérios para delimitação de áreas de influência em Estudos de Impacto Ambiental. Congresso Brasileiro de Avaliação de Impacto, 1.2012. **Anais[...]**. São Paulo: ABAI.2012

FRANZINELLI, E; IGREJA, H. Modern Sedimentation in the Lower Negro River, Amazonas State, Brazil. **Geomorph**, v. 44, n. 3 – 4, p. 241-259, 2002.

FRANCISCHETT, M. N.; BIZ, A. C. O mapa hipsométrico no estudo dos continentes. **Signos Geográficos**, Goiânia, v. 2, 2020.

FLORENZANO, T. G. (org.). Introdução a geomorfologia. In: FLORENZANO, T. G. **Geomorfologia: conceitos e técnicas atuais**, São Paulo: Oficina de textos, 2008. p. 11-30.

FROTA FILHO, A. B. **Análise da vulnerabilidade erosiva da Bacia Hidrográfica Colônia Antônio Aleixo, Manaus-AM**. 2016. 199 f. Dissertação (Mestrado em Geografia). Programa de Pós-Graduação em Geografia, UFAM, 2016.

FUSSEL, H.M. Vulnerability: A generally applicable conceptual framework for climate change research. **Global Environmental Change** v. 17, n. 2, p. 155–167. 2007.

FUSHIMI, M. **Vulnerabilidade ambiental aos processos erosivos lineares nas áreas rurais do município de Presidente Prudente-SP**. 2012. 141 f. Dissertação (Mestrado em Geografia). Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2012. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/entities/publication/7a167e8d-8b3e-41e8-8a41-dd0dc39558d3> Acesso: 27 jul. 2022

FUSHIMI, M. **Vulnerabilidade ambiental aos processos erosivos lineares da parte dos municípios de Marabá Paulista – SP e Presidente Epitácio – SP**. Tese (doutorado em Geografia). Universidade Estadual Paulista. Presidente Prudente, 2016.

FUNK, C. *et al.* The climate hazards infrared precipitation with stations-a new environmental record for monitoring extremes. **ScientificData**, v.2, n. 1,2015.

FLORENZANO, T. G. Geotecnologias na Geografia aplicada: difusão e acesso. **Revista Do Departamento De Geografia**, v.17, p.24-29, 2005. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/rdg/article/view/47272>. Acesso em: 24 jun. 2024.

GALLOPIN, G. C. Linkages between vulnerability, resilience, and adaptive capacity. **Global Environmental Change**, v. 16, n. 3, p. 293-303, 2006.

GOERL, R.F; KOBAYAMA, M; PELLERIN, J.R.G.M. Proposta metodológica para mapeamento de áreas de risco a inundação: estudo de caso do município de Rio Negrinho – SC. **Boletim geográfico**, v. 30, n. 1, p. 81-100, 2012.

GOERL, R. F.; KOBAYAMA, M; PELLERIN J. R. G. M. Mapeamento de vulnerabilidade no município de Rio Negrinho – SC: uma proposta metodológica. **Caminhos de Geografia Uberlândia**, v.12, n. 40, p. 205–221. 2010.

GUO, Z., XIAO, X., GAN, Y., ZHENG, Y. Ecosystem functions, services and their values-a case study in Xingshan County of China. **Ecological Economics**, v. 38, n. 1, p. 141-154.2001.

GRIGIO, A. M. **Aplicação de Sensoriamento Remoto e Sistema de Informação Geográfica na determinação da vulnerabilidade natural e ambiental do município de Guamaré (RN):** simulação de risco às atividades da indústria petrolífera. 2003. 222 f. Dissertação (Mestrado em Geodinâmica). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2003.

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

HERMUCHE, P. M; GUIMARÃES, G. M. A; CASTRO, S. S. Análise dos compartimentos morfopedológicos como subsídio ao planejamento do uso do solo em Jataí – GO. **GEOUSP Espaço e Tempo**, v. 13, n. 2, p. 113-132, 2009.

HENGL, T. A Practical Guide to Geostatistical Mapping. Vol. 52, University of Amsterdam, Amsterdam, 2009.

HILL, A. A; CUTTER, S. L. Methods for determining disaster proneness. In: CUTTER, S. L. (ed). **American Hazardscapes: The Regionalization of Hazards and Disasters**. Washington, D.C.:National Academy of Sciences, 2001. p. 13-36.

HOLZ, M. **Estratigrafia de seqüências: Histórico, Princípios e Aplicações**, Interciência, Rio de Janeiro. 2012. 272 P.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (Brasil). **Censo Demográfico 2010**. Rio de Janeiro: IBGE. 2010.

IBGE –Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (Brasil). **Manual técnico de uso da terra**. 3ª edição, Rio de Janeiro, 2013.

IBGE - Instituto Brasileiro De Geografia E Estatística (Brasil). **Manual técnico de vegetação brasileira**, 2ª ed., Rio de Janeiro: IBGE, 2012.

IGREJA, H. L. S. **Aspectos do modelo neotectônico da placa Sul-Americana na província estrutural amazônica, Brasil**. 2000. 151 f. Tese (Concurso de professor titular) - Departamento de Geologia UFAM, Manaus. 2000.

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Brasil). **Tutorial do Spring**. 2006. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/tutorial/>. Acesso em: 13 nov. 2024.

IRION, G. Sedimentation and sediments of Amazonian rivers and evolution of the Amazonian landscape since Pliocene times. In SIOLI, H. (ed.) **The Amazon limnology and Landscape of a Mighty Tropical River and its Basin**. Dr. W. Junk, Dordecht, p. 201 -214. 1984.

ISDR - INTERNATIONAL STRATEGY FOR DISASTERREDUCTION. **Visions of Risk: A Review of International Indicators of Disaster Riskand its Management**. London: Inter Agency Task force on Disaster Reduction, 2004.73 p.

KÖPPEN, W. **Climatologia**: con un estudio de los climas de la Tierra. Mexico: Fondo de Cultura Económica, 1948. 479 p.

KLAIS, T. B. A; DALMAS, F. B; MORAIS, R. P; ATIQUE, G; LASTORIA, G; FILHO, A. C. P. Vulnerabilidade natural e ambiental do município de Ponta Porã, Mato Grosso do Sul, Brasil. **Revista Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**: v. 7, n.2, 2012.

LATRUBESSE, E. M; FRANZINELLI, E. Late Quaternary alluvial sedimentation in the upper Rio Negro Basin, Amazonia, Brasil: paleohydrological implications. In: BENITO, G.; BAKER, V.; GREGORY, K. **Paleohydrology and environmental change**. Chichester, England: John Willey & Sons, p. 259 - 271, 2002.

LEFF, E. **Epistemologia ambiental**. 5 ed. São Paulo: Cortez, 2010.240 p.

LIMA E. Q.; AMARAL, R. F. Vulnerabilidade da zona costeira de Pititinga/RN, Brasil. **Mercator**, v. 12, n., p. 141 – 153. 28, 2013. Disponível em: <http://www.mercator.ufc.br/index.php/mercator/article/view/733/48920>. Acesso: 20 set. 2022.

LIRA, K. C. S.; FRANCISCO, H. R.; FEIDEN, A. Classificação de fragilidade ambiental em bacia hidrográfica usando lógica Fuzzy e método AHP. **Sociedade & Natureza**, Uberlândia, MG, v.34, 2022. Disponível em:<https://www.scielo.br/j/sn/a/WfwdNkZLH5jLShDmMFZhfvf/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 24 mar. 2024

LOCH, R, E. N. Cartografia Tátil: mapas para deficientes visuais. **Portal da Cartografia**, v. 1, n. 1, 2008.

LÓPEZ-BERMEO, C.; MONTOYA, R.D.; CARO-LOPERA, F.J.; DIAZ-GRACIA, J.A. Validation of the accuracy of the CHIRPS precipitation dataset at representing climate variability in a tropical mountainous region of South America. **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 127, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.pce.2022.103184>. Acesso em: [https](https://doi.org/10.1016/j.pce.2022.103184) 18 jan. 2024.

LUCAS, Y. *et al.* Transição latossolos-podzóis sobre a formação Barreiras na região de Manaus, Amazônia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 8, n. 3, 1984.

LUERS, A.; LOBELLD, B.; SKLAR, L. S.; ADDAMS, C. L.; MATSON, P. A. A method for quantifying vulnerability, applied to the agricultural system of the Yaqui Valley, Mexico. **Global Environmental Change**, v. 13, n. 4, 2003, p. 255-267, Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0959-3780\(03\)00054-2](https://doi.org/10.1016/S0959-3780(03)00054-2). Acesso em: 22/10/2023.

MARQUES, J. D. O. *et al.* Estudo de parâmetros físicos, químicos e hídricos de um latossolo amarelo na região Amazônica. **Acta Amazônica**, Manaus, n. 34, p. 145- 154, 2004.

MATHIAS, D. T.; LUPINACCI, C. M.; NUNES, J. O. R. The identification of runoff flows in an area of technogenic relief using hydrological models in GIS. **Sociedade & Natureza**, v. 34, n.2, p. 772 - 783, 2020

MENDONÇA, F; OLIVEIRA, I. M. D. **Climatologia: noções básicas e climas do Brasil**. São Paulo: Oficina de Texto, 2007. 206 p.

MENDES, L. P. O.; ROMEIRO, M. R. M.; PIMENTA, L. J. L.; OLIVEIRA, W. F.; SANTOS, S. R. Análise da precipitação pluviométrica por meio de dados CHIRPS e google earth engine. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 25, n. 101, p. 174–192, 2024.

MENDONÇA, F. A. **O clima e o planejamento urbano de cidades de porte médio e pequeno: proposição metodológica para o estudo e sua aplicação à cidade de Londrina/PR. 1995**. 381 f. Tese (Doutorado em Geografia) - USP, São Paulo. 1995.

MENIN, F. A; REIS, F. A. G. V; GIORDANO, L. C.; AMARAL, A. M. C.; GABELINI, B. M; CERRI, R. I. Critérios de delimitação de áreas de influência em Estudos de Impacto Ambiental de rodovias: abordagem de processos de dinâmica superficial. **Geologia USP**, v. 17, n. 3, p. 209-224. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9095.v17-129123>. Acesso em: 12/06/2024.

MILANEZI, C. H. S; PEREIRA, J. G. Caracterização da Vulnerabilidade Ambiental na Microbacia Do Córrego Azul, Ivinhema – MS. **Geografia**, Londrina, v. 25. n. 1. p.43-63, jan/jun, 2016.

MINÁR, J.; EVANS, I. S. Elementary forms for land surface segmentation: the theoretical basis of terrain analysis and geomorphological mapping. **Geomorphology**, v. 95, n. 3 - 4, p. 236–259, 2008.

MOLION, L.C.B. Amazonia rainfall and its variability. In: BONELL, M.; HUFSCHMIDT, M.M.; GLADWELL, J.S. **Hydrology and water manegement in the humid tropics**. (ed.). Cambridge: Cambrigde University Press, p. 99-111. 1993.

MOLINIER, M. *et al.* Hidrologia da bacia do rio Amazonas. **A Água Em Revista**, Belo Horizonte, ano 2, n. 3, p. 31-36, 1994.

OLÍMPIO, J. L. S. A vulnerabilidade natural e ambiental do município de Fortaleza/CE. **Boletim Goiano de Geografia. Goiânia**, v.31, n.2, p.13-27, jul./dez. 2011.

OLIVEIRA, F. A. *et al.* Variabilidade de precipitação estimada dos municípios da Região Metropolitana de Manaus – RMM, utilizando dados da tropical rainfall measuring mission (TRMM). In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 20, 2023. **Anais eletrônicos...**. São José dos Campos, INPE, 2023.

ONU. **Living with Risk: A global review of disaster reduction initiatives**. Nova Iorque: Geneva: UN, 2004. 429 p.

PELOGGIA, A. U. G. **O homem e o ambiente geológico: geologia, sociedade e ocupação urbana no município de São Paulo**. São Paulo: Xamã, 1998.

PINESE JÚNIOR, J. F; RODRIGUES, S. C. O método de análise hierárquica -AHP - como auxílio na determinação da Vulnerabilidade Ambiental da bacia hidrográfica do rio Piedade, (MG). **Revista do Departamento de Geografia –USP**, v. 23, p. 4-26, 2012.

PITA, R. C. S. *et al.* Sistema aquífero Alter do Chão a oeste da cidade de Manaus (AM): processos hidrogeoquímicos, origem da salinidade e relações com aquíferos adjacentes. **Geologia USP**. v.18, n. 1, p. 273-296,2018. Disponível em:<https://doi.org/10.11606/issn.2316-9095.v18-134253>. Acesso em 08 dez. 2024.

POELKING, E.L; LAUERMANN, A; DALMOLIN, R.S.D. Imagens CBERS na geração de NDVI no estudo da dinâmica da vegetação em período de estresse hídrico. In: SBSR - Simpósio Brasileiro De Sensoriamento Remoto, 13, 2007. [**Anais...**]. Florianópolis, SC, 2007.

QUEIROZ, M. E.; ALVES, N. Neotectônica na bacia hidrográfica do mindu - manaus - amazonas. **Geoconexões**, v.1. p. 40-52,2006.

REIS, N. J. *et al.* **Geologia e Recursos Minerais do Estado do Amazonas**. Manaus: CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 2006.

REIS, N. J.; FERREIRA, A. L.; RIKER, S. L.; ALMEIDA M.E. (ed.). **Geologia e recursos minerais do estado do Amazonas**. Manaus, CPRM/CIAMA, 2006.

RIBEIRO, F; CAMPOS, S. Vulnerabilidade à erosão do solo da região do Alto Rio Pardo, Pardinho, SP. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande – PB, UFCG, v. 11, n. 6, p.628–636, 2007.

RIKER, S. R. L. Recursos Minerais. In: MAIA, M. A. M.; MARMOS, J. L. **Geodiversidade do Estado do Amazonas**. Manaus: CPRM. p. 125 - 140, 2010.

RINCÓN-AVALOS, P.; KHOUAKHI, A.; MENDOZA-CANO, O.; LA CRUZ, J.L.; PAREDES-BONILLA, K.M. Evaluation of satellite precipitation products over Mexico using Google Earth Engine. **Journal of Hydroinformatics**, v. 24, n. 4, p. 711-729, 2022.

ROSA JD, COOPER M, DARBOUX F, MEDEIROS JC. Processo de formação de crostas superficiais em razão de sistemas de preparo do solo e chuva simulada. **Rev Bras Ciênc Solo**, v.37, n.2, p. 400 – 410, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000200011>. Acesso em: 18/07/2024.

ROSS, J. L. S. Análise Empírica da Fragilidade dos Ambientes Naturais e Antropizados. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 8, p. 63 - 74, 1994. Disponível em: <https://revistas.usp.br/rdg/article/view/47327>. Acesso em 20 jan. 2024.

RODRIGUES, T.; TOMMASELLI, J. T. G.; ARROIO JUNIOR, P. P. Mapeamento da vulnerabilidade aos processos erosivos a partir de métodos multicriteriais: um estudo sobre as condições ambientais da bacia hidrográfica da represa laranja doce, Martinópolis (SP). **Revista Formação**, v. 25, n. 45, maio-ago./2018, p. 67-91.

RODRIGUES, R. Erosão em Rodovias: Problema a ser resolvido. In: Simpósio Nacional de Controle de Erosão, 5., 1995. **Anais [...]**. Bauru - São Paulo: ABGE/DAEE, 1995.

RODRIGUES, T. E.; OLIVEIRA JÚNIOR, R. C.; SILVA, J. M. L.; VALENTE, M. A.; CAPECHE, C. **Características físico-hídricas dos principais solos da Amazônia Legal**. I. Estado do Pará. Rio de Janeiro: Embrapa, 1991. 236 p.

RUBIRA, F. G.; MELO, G. V.; OLIVEIRA, F. K. S. Proposta de padronização dos conceitos de erosão em ambientes úmidos de encosta. **Revista de Geografia**, Recife. v. 33, n. 1, 2016.

SALOMÃO, F. X. T. O início do processo erosivo. In: GUERRA, A. J. T.; SILVA, S. A.; BOTELHO, R. G. M. (Org.). **Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações**. 2. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2010.

SÁNCHEZ, L. E. **Avaliação de Impacto Ambiental: Conceitos e Métodos**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. v. 1. 495 p. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/001558722>. Acesso em: 25 abr. 2024.

SANTOS, H. G.; *et al.* **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 356 p.

SANTOS, H. G. *et al.* **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2006. p. 306. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/93143/1/sistema-brasileiro-de-classificacao-dos-solos2006.pdf>. Acesso em: 08 abr. 2024

SANTOS, R. F. DOS. **Planejamento Ambiental – teoria e prática**. São Paulo: Oficina de Textos, 2004.

SANTOS, R. F; CALDEYRO, V. S. Paisagens, condicionantes e mudanças. In: SANTOS, R. F. (Org.). **Vulnerabilidade Ambiental: desastres ambientais ou fenômenos induzidos?** Brasília: MMA, 2007.

SANTOS, B. C.; SANCHES, R. G.; MELOBOLLELI, T.; SOUZA, P.H., BOURSCHEIDT; V. On the quality of satellite-based precipitation estimates for time series analysis at the central region of the state of São Paulo, Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 151, n. 1, p. 467-489, 2023.

SANTOS, M. F. S. **Geoprocessamento aplicado ao estudo da vulnerabilidade ambiental na Serra da Calçada-MG**. 2004. 45 f. Monografia (Especialização em Geoprocessamento) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerias, 2014.

SAREWITZ, D; PIELKE JR., R.A; BYERLY JR., R.(ed.). **Prediction: Science, Decision Making, and the Future of Nature**. Island Press, 2000.

SILVA, J. M. L. da. **Caracterização e classificação de solos do Terciário no nordeste do Estado do Pará**. 1989. 189 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Itaguaí, 1989.

SILVA, F. M; ALMEIDA, L. Q. Uma abordagem sobre a vulnerabilidade socioambiental no ambiente estuarino: aspectos teóricos-conceituais. **GEONORTE**, Edição Especial, v.1, n.4, p.102 - 112, 2012.

SILVA, G. M. da. **Geomorfologia aplicada a caracterização da vulnerabilidade à erosão dos solos em Rio Preto da Eva (AM)**. 2021. 166 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2021.

SILVA, I. N. **Geomorfologia e planejamento ambiental: identificação e monitoramento de voçorocas no sítio urbano de Iranduba/AM**. 2020. 114 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal do Amazonas, 2020.

SILVA, G. A; COSTA, R. A. Paisagem e Fragilidade Ambiental Natural da Bacia Hidrográfica do Ribeirão São Lourenço, Ituiutaba/Prata – MG. **Caminhos de Geografia Uberlândia** v. 12, n. 39. p. 151 - 166, 2011.

SILVA, C. B. *et al.* Precipitação na América do Sul dados obtidos em estações meteorológicas automáticas e sistemas orbitais. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 25, p. 54-79, 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v25i0.58813>. Acesso em: 29/10/2019.

SOUZA, K. R. G; LOURENÇO, L. Evolução do conceito de risco à luz das ciências naturais e sociais. **Revista Territorium**, Rio de Janeiro, n. 22, 2015.

SOUZA, V. S.; NOGUEIRA, R. A. C. Manaus-Presidente Figueiredo (AM), borda norte da Bacia do Amazonas: um guia para excursão de campo. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 39, n. 1, p. 16-29, 2009.

SHINZATO, E.; *et al.* **Os solos do distrito agropecuário da Suframa – DAS**. Manaus: [S. n.], 2005.

SPORL, C; ROSS, J. L. Análise da fragilidade ambiental relevo solo com aplicação de três modelos. **GEOUSP: Espaço e Tempo**, São Paulo, v. 15, p. 39-49, 2004. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/geousp/article/view/123868>. Acesso em: 29/10/2019.

TAGLIANI, C. R. Técnica para avaliação da vulnerabilidade ambiental de ambientes costeiros utilizando um sistema geográfico de informações. In: SBSR - Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 11. **Anais [...]**. Belo Horizonte, MG. 2003. p. 1657 - 1664.

TASSINARI, C. C. G; MACAMBIRA, M. J. B. A evolução tectônica do Cráton Amazônico. In: **Geologia do continente sul-americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida**. São Paulo: Beca, 2004.

TAVARES, J. S. **Análise preliminar da ocorrência de voçorocas na BR-174, Trecho Manaus - Presidente Figueiredo (AM)**. Relatório de Pesquisa

TEIXEIRA, W. G; ARRUDA, W. da C; LIMA, H. N; IWATA, S. A; MARTINS, G. C. Building a digital soil data base of the Solimões river region in the Brazilian Central Amazon. In: HARTEMINK, A. E.; MCBRATNEY, A.; MENDONÇA-SANTOS, M. L. (Org.). **Digital soil mapping with limited data**. Heidelberg: Springer, 2008, v. p. 50-64.

TIMMERMAN, P. **Vulnerability. Resilience and the collapse of society: A review of models and possible climatic applications**. Environmental Monograph 1, Institute for Environmental Studies, University of Toronto, 1981.

TÓRNIO, C. A. A.; KEDE, M. L. F. M.; SOUZA, L. S. Avaliação do desempenho das estimativas de precipitação do produto CHIRPS para os municípios de São Gonçalo e Niterói (RJ). **Revista Brasileira De Climatologia**, 34(20), 79–103.

TORRES, F. S. M. **Carta de suscetibilidade a movimentos de massa e erosão do Município de Ipojuca - PE**. 105 f. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2014.

TRICART, J. **Ecodinâmica**. Rio de Janeiro. IBGE, 1977. 91 p.

TROPPEMAIR, H. **Biogeografia e meio ambiente**. 9ª ed., Rio de Janeiro: Technical Books, 2012. 281p.

UNDP – United Nations Development Program. **Reducing disaster risk: a challenge for development**. New York: UNDP, 2004.

VAZ, J. G; CARNEIRO, V. A.; BATA, J. E. Caracterização dos depósitos tecnogênicos: município de Anápolis (GO). **Revista Sapiência: Sociedade, Saberes e Práticas Educacionais** v.8, n.3, p. 71-85, jul./dez., 2019.

VALERIANO, M. M. Dados topográficos. In: FLORENZANO, T. **Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais**. São Paulo: Oficina de Texto, 2008. p. 72-103.

VEYRET, Y. **Os riscos: O homem agressor e vítima do meio ambiente**. São Paulo: Contexto, 2007. 320 p.

VELOSO, H. P.; RANGEL FILHO, A. L. R.; LIMA, J. C. A. **Classificação da vegetação brasileira, adaptada a um sistema universal**. Rio de Janeiro: IBGE - Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais, 1991. 124p.

VIEIRA, A. F.G. **Desenvolvimento e distribuição de voçorocas em Manaus (AM): principais fatores controladores e impactos urbanos-ambientais**. 2008. Tese (doutorado em Geografia) - Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Departamento de Geografia, Universidade Federal de Santa Catarina, 2008.

VIEIRA, A.F.S.G; ALBUQUERQUE, A. R. Cadastramento de voçorocas e análise de risco erosivo em estradas: BR-174. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA E ENCONTRO SULAMERICANO DE GEOMORFOLOGIA, 5., 1., 2004, Santa Maria - RS. **Anais [...]**. Santa Maria: Editora da UFSM, 2004. p.50-65.

VITORINO, J. C.; ANDRADE, M. R. M.; PELOGGIA, A. U. G.; SAAD, A. R.; OLIVEIRA, A. M. S. Terrenos tecnogênicos do Jardim Fortaleza, bacia hidrográfica do Córrego do Entulho, Guarulhos (SP): mapeamento geológico, estratigrafia, geomorfologia e arqueologia da paisagem. **Revista UNG: Geociências**, Guarulhos, v. 15, n. 2, p. 33-60, 2016.

VOLPE, L. L. **Análise da paisagem no entorno dos eixos viários: o exemplo do Rodoanel Mario Covas na RMSP**. 2009. 211f. Dissertação (Mestrado em Geografia Física) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

VOLK, L. B. S; COGO, N. P; STRECK, E. V. Erosão hídrica influenciada por condições físicas de superfície e subsuperfície do solo resultantes do seu manejo, na ausência de cobertura vegetal. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 4, p. 763-774, jul./ago. 2004.

WARMINGTON, V. Disaster reduction: a review of disaster prevention, mitigation and preparedness. **Reconstruction and Rehabilitation Fund of the Canadian Council for International Cooperation, Ottawa**. 1995.

WEI, Y.M; FAN, Y.; LU, C.; TSAI, H-T. The assessment of vulnerability to natural disasters in China by using the DEA method. **Environmental Impact Assessment Review**, v.24, p. 427–439, 2004.

YASOJIMA, C. T. K. **Modelo de Krigagem Automática Baseada em Agrupamento**. 2020. 86 f. Tese (Doutorado em Ciência da Computação) - Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação, Instituto de Ciências Exatas e Naturais, Universidade Federal do Pará, Belém, 2020.

9. ANEXOS

FICHA DE CADASTRAMENTO/MONITORAMENTO			
Data do Monitoramento:			
1. Localização e Identificação da Voçoroca:			N°
Acesso:			
Bairro:		Zona:	
2. Coordenadas:			
3. Dados das Voçorocas			
Datas dos Monitoramento	1°	2°	3°
Comprimento (m):			
Largura (m):			
Profundidade (m):			
Área:		Volume:	
Direção:		Tipo:	
Forma:		Tamanho:	
Dist. Da pista:		Evolução:	
Orient. Da pista:			
4. Geologia:			
5. Geomorfologia:			
() Platô () Baixo () Encosta			
Características da Encosta			
() Superior () Média () Inferior			
Forma:		Comprimento:	
Declividade:		6. Solo:	
() Inalterado () Alterado () Compactado () Crostas			
() Latossolo () Espodssolo () Argissolo () Aterro			
7. Histórico de Ocorrência:			
8. Uso e ocupação da área montante:			
9. Uso e ocupação área a jusante:			
10. Danos materiais			
11. Danos ambientais:			
12. Medida de contenção adotada:			
13. Previsão de evolução:			
14. Observações gerais:			
15. Bacia hidrográfica:			

