



UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
INSTITUTO DE FILOSOFIA, CIÊNCIAS HUMANAS E SOCIAIS
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA



ANDRÉ CAMPOS ALVES

NATURALMENTE COMPLEXA, NITIDAMENTE FRAGMENTADA:
SENSITIVIDADE DA PAISAGEM NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO
PURAQUEQUARA, MANAUS – AMAZONAS / BRASIL

MANAUS
2026

ANDRÉ CAMPOS ALVES

**NATURALMENTE COMPLEXA, NITIDAMENTE FRAGMENTADA:
SENSITIVIDADE DA PAISAGEM NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO
PURAQUEQUARA, MANAUS – AMAZONAS / BRASIL**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia, área de concentração Domínio da Natureza na Amazônia, do Instituto de Filosofia, Ciências Humanas e Sociais da Universidade Federal do Amazonas, em cumprimento aos requisitos necessários à obtenção do título acadêmico de Doutor em Geografia.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Fábio Sabbá Guimarães Vieira

MANAUS
2026

Ficha Catalográfica

Elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

-
- A474n Alves, André Campos
 Naturalmente complexa, nitidamente fragmentada: sensibilidade da paisagem na
 bacia hidrográfica do rio Puraquequara, Manaus – Amazonas
 / Brasil / André Campos Alves. - 2026. 189 f. :
 il., color. ; 31 cm.
- Orientador(a): Antonio Fábio Sabbá Guimarães Vieira.
 Tese (doutorado) - Universidade Federal do Amazonas, Programa de Pós-
 Graduação em Geografia, Manaus, 2026.
1. Sensibilidade da paisagem. 2. Geomorfologia. 3. Unidades de paisagem. 4.
 Uso e ocupação da terra. 5. Bacia hidrográfica do rio Puraquequara. I. Vieira,
 Antonio Fábio Sabbá Guimarães. II. Universidade Federal do Amazonas.
 Programa de Pós-Graduação em Geografia. III. Título
-

ANDRÉ CAMPOS ALVES

**NATURALMENTE COMPLEXA, NITIDAMENTE FRAGMENTADA:
SENSITIVIDADE DA PAISAGEM NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO
PURAQUEQUARA, MANAUS – AMAZONAS / BRASIL**

Aprovado em 25 de fevereiro de 2026.

Banca Examinadora

Prof. Dr. Antonio Fábio Sabbá Guimarães Vieira (Orientador)
PPGEOG/UFAM

Prof. Dr. Osvaldo Girão da Silva
PGGEO/UFPE

Prof. Dr. Hikaro Kayo de Brito Nunes
UEA/CEST – Campus de Tefé/AM

Prof. Dr. Flávio Wachholz
PGGEO/UEA

Prof. Dr. Deivison Carvalho Molinari
PPGEOG/UFAM

MANAUS
2026

AGRADECIMENTOS

Este momento é muito aguardado, porque sinaliza uma das etapas finais de um trabalho científico. Isso simboliza que a missão foi cumprida e que o bom combate foi combatido com muita fé (2 Timóteo 4:7). Embora este versículo seja frequentemente associado a contextos de despedida, aqui ele simboliza alegria, conquista e um novo começo.

Na dissertação, afirmei que este é um momento de reflexão, e essa ideia continua válida. De lá para cá, contudo, aprendi que não existem palavras capazes de realmente retribuir o gesto ou a atitude de alguém que age desinteressadamente, especialmente em um mundo que frequentemente estima mais o retorno do que a generosidade. Graças a **Deus**, as pessoas ao meu redor, inspiradas por princípios como os de Filipenses 2:3-4 e Atos 2:44, não agem por interesse próprio ou vanglória; ao contrário, consideram os outros superiores a si mesmas, mantendo-se unidas em comunhão e com coração singelo, priorizando algo duradouro em vez do momentâneo.

Eu não pretendo seguir uma ordem de importância. Contudo, como já falamos sobre Ele, agradeço a **Deus**, a quem devo tudo, sem merecer nada. Pela graça Dele, estou aqui e alcancei este momento. A Ele também sou grato por conceder-me saúde, guiar meus passos e fortalecer-me nos momentos em que meu psicológico, em diferentes fases, precisou ser restaurado. A graça de Deus se manifesta de muitas formas, inclusive por meio de pessoas que Ele coloca em nosso caminho para que não desanimemos.

Na minha vida, Ele colocou **Gabriela Mendonça da Silva**, que, após quatro anos de caminhada juntos, decidiu acrescentar o “*Alves*” ao seu nome. Em outras palavras, comecei o doutorado namorando e terminei com uma algaema no dedo anelar. Agora estamos cursando o doutorado da vida; este, sem prazo para acabar. Obrigado, “*chaveirinho*”, como carinhosamente te chama nosso orientador. Agradeço pela presença nas atividades de campo, pelos debates (às vezes, discussões fervorosas), por me ajudar na escrita e por me oferecer o baluarte que todo estudante precisa nessa fase. Em cada etapa, na pesquisa, na fé e na vida, você esteve comigo.

Como já foi feita menção ao orientador deste trabalho, é perfeitamente oportuno agradecer àquele que, como é dito pela Família Latossolo, é “*o melhor orientador do mundo*”: **Antonio Fábio Sabbá Guimarães Vieira**. São muitos nomes para uma só pessoa, mas eu escolhi chamá-lo de Fábio; professor Fábio. Tenho plena consciência de que fui um desafio para ele. Dei trabalho. Perdi prazos e, com certeza, ele perdeu alguns cabelos por minha causa. Ainda bem que tem muitos. Tenho certeza de que ele acreditou mais neste momento do que eu mesmo.

Ao longo dessa caminhada, aprendi com o professor Fábio muitas coisas, não apenas sobre o meio acadêmico, mas sobre a vida. Sempre tivemos uma boa relação, e nunca nos faltou respeito. Momentos de estresse fazem parte do processo, mas os bons amigos também brigam pela melhora do outro. Eu espero que ele me considere assim: **um amigo**. Porque é assim que hoje o vejo. Uma frase dele que me marcou fortemente foi: *“Existem dois tipos de doutores: os de fato e os de direito”*. Eu entendi a mensagem naquele dia e, ao final, disse a ele: *“Professor, eu só quero ir para a defesa se for para ser doutor de fato”*. Valeu, professor **Fábio**. O senhor é uma pessoa de bom coração. Sentirei falta das nossas resenhas, mas agora temos mais tempo para colocá-las em dia tomando café e comendo bolo de chocolate.

A Família Latossolo é notável e dinâmica, composta por pessoas com diferentes níveis de capacidade. Mas, dentro de suas possibilidades, todos buscam contribuir de alguma forma. **Francisco Weliton Rocha Silva** foi imprescindível, tanto pela sua competência quanto pela dedicação. Ele me auxiliou na análise das amostras de solo e, em muitos momentos, foi alguém que, por meio de seus exemplos, me ajudou a tomar decisões acadêmicas importantes diante das adversidades. Valeu, **Weliton**. Sem você eu teria conseguido, mas sem a mesma confiança, leveza e certeza de estar no caminho certo.

Os professores Fábio e Weliton são doutores, com trajetórias consolidadas. Mas, como já mencionei, a Família Latossolo é composta por pessoas em diferentes estágios, com distintas experiências e contribuições. **Ângelo Gabriel Santiago Gouvêa** era estudante de graduação quando nos tornamos peças quase fundamentais nas atividades de campo. Hoje, é mestrando (e que bom, porque ele merece e é capaz). Ângelo é alguém que foge ao padrão da maioria das pessoas da sua idade. Quem sabe seja por isso que a gente se dá tão bem. Ele tem maturidade e uma disposição rara para aprender e colaborar. Obrigado por estar comigo nos campos, por carregar equipamentos, por dividir o cansaço e, acima de tudo, por dividir o ânimo. Sei que esse agradecimento é pequeno diante de todo o esforço e suor que você dedicou, mas é sincero.

Tratando-se de “força braçal”, não posso deixar de lembrar do meu irmão, **Daniel de Sá Campos Alves**. Ele esteve ao meu lado em quase todas as situações que exigiam vigor físico. Foram muitos finais de semana em que poderia estar com sua namorada, mas fez a escolha de me ajudar. Não sei se, de alguma forma, influenciei sua decisão de cursar Geografia. Hoje, Daniel é servidor público e professor no município de Novo Airão. Orgulho de você, meu irmão.

Agradecer à **Família Alves Martendal** é também agradecer a uma generosidade que só a família é capaz de oferecer sem condições. Minha irmã, **Andressa**, e **Henrique Martendal** abriram as portas de sua propriedade para que eu pudesse realizar os testes físicos de solo, etapa

indispensável para a construção dos resultados desta tese. Não me perguntaram por quê, não impuseram horários e não mediram esforços. Simplesmente disseram sim. Às vezes, é exatamente esse tipo de gesto silencioso que sustenta um trabalho científico por dentro, longe dos holofotes e dos créditos formais. Obrigado por isso.

Como estou falando de família, não poderia deixar de lembrar do meu pai, minha mãe e **minhas irmãs**. Meu pai, até pouco tempo atrás, tinha apenas a 4ª série. Ainda assim, sempre tive orgulho dele. Mas hoje esse orgulho é ainda maior. Recentemente, algo o impulsionou a concluir o ensino médio, e acredito que essa pretensão surgiu ao ver seus seis filhos formados. **Ananias da Silva Alves**, meu pai, obrigado.

Durante o mestrado, minha mãe, **Evelize de Sá Campos**, me olhou com aquele olhar sincero e fez duas perguntas: “*Meu filho, você já não completou os estudos? Para que fazer esse negócio aí?*”; com aquele jeito singular de transformar preocupação em carinho. Naquele dia, respondi que precisava passar por aquilo para chegar ao doutorado. Mais tarde, já no doutorado, ela indagava: “*Ainda falta muita coisa para terminar? Entrega logo isso para o teu professor, meu filho. Eu estou quase indo lá falar com ele*”. Ela acompanhou muitas das minhas batalhas. Nunca reclamei, porque foi uma escolha minha. Porém, ela me conhece. Sabia que eu estava lutando. Obrigado, mãe. Não sou de falar, mas meu coração sempre diz que te amo.

Relendo os agradecimentos até aqui, percebi que mencionei aqueles que estiveram mais presentes na construção deste trabalho. Mas há uma infinidade de pessoas, amigos e conhecidos, que também contribuíram. Partindo desse princípio, não poderia deixar de lembrar do professor **Osvaldo Girão da Silva**, carinhosamente conhecido no departamento de Geografia (UFAM) como Girão. Acredito que esse apelido afetuoso já seja, na verdade, de fama nacional.

O professor Girão participou deste trabalho tanto na disciplina de Seminários de Tese I quanto na minha qualificação. Jamais esquecerei que, no primeiro encontro, ele esteve presente mesmo vivendo um período delicado. Esse gesto, que sempre compartilho com outros, revela a nobreza de alguém que honra a palavra e se dedica ao que acredita.

Agradeço profundamente, professor Girão. Sua principal contribuição está registrada no início do capítulo 4, mas o impacto maior foi a lição silenciosa daquele dia: a vida é breve e, justamente por isso, fazer o bem é o que realmente dá sentido ao caminho.

Ainda no Nordeste brasileiro, destaco o professor **Jonas Otaviano Praça de Souza**, que contribuiu na disciplina Seminários de Tese II. Naquele dia, levei um bom "puxão de orelha", entretanto, na vida acadêmica, estamos sujeitos a isso, e precisamos estar preparados. Ele foi

fundamental para que eu corrigisse o trabalho estruturalmente e criticou, de forma construtiva, a maneira como escrevo. Sei que minha escrita é, por vezes, prolixa, algo já apontado pelo meu orientador atual e pelo meu ex-orientador, José Alberto Lima de Carvalho, que chegou a transformar essa característica em apelido. Agradeço por ter reforçado esse ponto, professor Jonas. Ainda há muito a aprimorar, mas sigo evoluindo.

Falando em orientadores, agradeço àqueles que fizeram parte da minha formação antes do doutorado, desde as graduações, licenciatura e bacharelado em Geografia, até o mestrado. Em ordem cronológica: **Isaque dos Santos Sousa** (UEA), **Emádina Gomes Rodrigues** (UEA), **Deivison Carvalho Molinari** (UFAM), **José Alberto Lima de Carvalho** (UFAM) e **Jesuéte Pachêco Brandão** (UFAM). Cada um, à sua maneira, contribuiu para que eu chegasse até aqui.

Dentre eles, o professor **Deivison** percorreu comigo mais de uma etapa desta caminhada. Antes de orientador, foi referência; antes da banca, já havia deixado marcas na forma como aprendi a enxergar o espaço. Tê-lo na defesa foi, ao mesmo tempo, um reencontro e uma chance. A professora **Jesuéte**, por sua vez, segurou a minha mão nos primeiros seis meses do doutorado, etapa que, quem passa, sabe o quanto pesa. Aprendi muito e reconheço sua participação, dos valiosos pitacos acadêmicos aos conselhos de mãe. Obrigado a ambos.

Mas nem só de orientadores vive o orientando. Em muitos momentos, é necessário buscar ajuda externa. Foi assim que encontrei o professor **Flávio Wachholz**. Muitas vezes sabemos a teoria, sabemos que é possível... mas não sabemos como fazer. E foi justamente nessa hora que o professor Flávio me ajudou. Perito na área de geoprocessamento, ele tirou um tempo da sua agenda e, em uma única tarde, conseguiu sanar as dificuldades que eu enfrentava naquele momento, em 2023. Sua ajuda foi essencial para o avanço do trabalho, mas sua presença não se encerrou ali: mais adiante, você integrou a banca de defesa, e essa participação também deixou sua marca nesta tese. Obrigado, professor.

Além dos professores que cruzaram meu caminho, também sou grato aos amigos **Franciney Souza Santos** e **Moisés Barbosa da Silva**, que me acompanham desde a primeira graduação. Amigo de verdade incentiva o crescimento do outro e, por isso, registro aqui que Moisés foi o primeiro entre nós a conquistar o título de doutor. Deixo agora um recado para o Franciney: meu amigo, estamos te esperando e prontos para te ajudar no que for preciso.

Agradeço a todos os professores do **Programa de Pós-Graduação em Geografia da UFAM**, que me acolheram e contribuíram de forma decisiva para a minha formação ao longo dessa caminhada. Deixo um agradecimento especial à professora **Mircia Ribeiro Fortes**, cuja

participação na minha qualificação foi muito importante para o amadurecimento desta tese. Sua ajuda está enfatizada no capítulo 3 e foi essencial para que eu enxergasse ajustes.

Agradeço ao professor **Hikaro Kayo de Brito Nunes**, membro da banca examinadora, cuja leitura se distinguiu pela sensibilidade com que percorreu o trabalho. Há contribuições que chegam na forma de críticas cirúrgicas, e outras que chegam como reconhecimento. O professor Hikaro soube oferecer as duas. Dentre seus registros, um me tocou de forma especial: ao comentar o título, ele destacou a delicadeza da expressão. Para quem passou tempo considerável escolhendo cada palavra daquele título, ouvir isso da banca tem um peso que vai além do elogio. É a confirmação de que a comunicação foi bem-sucedida. Obrigado, professor Hikaro, pelas contribuições que levei para a versão final e pela generosidade do seu olhar.

Há contribuições que chegam sem aviso e, por isso mesmo, surpreendem ainda mais. O professor **Nelcione José de Souza Araújo** foi, sem saber, responsável por uma delas. Às vésperas do encerramento desta tese, foi por meio dele que consegui acesso às voçorocas da margem esquerda, área sob proteção do Exército Brasileiro e que, até então, permanecia fora do meu alcance. Esse acesso não era apenas logístico; era vital. Sem ele, uma parte importante da análise de campo teria ficado incompleta. Às vezes, as portas mais importantes são abertas por quem nem sabe que estava segurando a chave. Obrigado, professor Nelcione.

Também deixo um agradecimento ao professor **Marcos Castro de Lima**, que, à época, como coordenador do curso, acreditou em mim e fez o possível para que eu pudesse receber a bolsa da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). Sua confiança fez diferença num momento crucial. Agradeço também ao **CAPES** pelo apoio financeiro, que tornou esta pesquisa viável.

Inevitável seria encerrar estes agradecimentos sem recordar o instante em que o cansaço já se fazia rotina e, mesmo assim, algo mudou. Silenciosamente, o percurso ganhou outra cadência, revelando forças que pareciam adormecidas. Impossível precisar em que momento o ânimo se renovou, apenas sentir que havia motivo para seguir. Seguindo adiante, restou a certeza de que certos encontros, ainda que sutis, transformam o caminho todo.

Termino esta caminhada com alegria. A missão foi cumprida, e um novo começo se abre. Que as escolhas que fizemos e as que ainda faremos sejam guiadas por sabedoria, regadas por generosidade e deem bons frutos no tempo certo. **Valeu!**

*Desenhada como uma folha sobre a terra, a bacia
do Puraquequara vive em frágil equilíbrio. Em
uma margem, a força do solo intacto; na outra, a
cicatriz que testa os limites de sua resistência.*

(André Campos Alves)

RESUMO

Este trabalho analisa a sensibilidade da paisagem na Bacia Hidrográfica do Rio Puraquequara (BHRP), no setor leste de Manaus, como recorte para compreender a interação entre processos naturais e pressões humanas na Amazônia urbana. A escolha da área justifica-se não apenas por sua inserção em um espaço sob expansão urbana, mas pela combinação de diversidade morfoestrutural, forte sazonalidade hidrológica, elevada conectividade entre água e sedimentos e coexistência de unidades de paisagem com dinâmicas contrastantes, testadas pelo pulso de cheias e vazantes do regime amazônico. A BHRP se destaca no entorno de Manaus por reunir, num gradiente, nascentes em floresta primária protegida, diversidade morfoestrutural interna e uma frente de áreas de cultivo, urbanização, industrialização e infraestrutura heterogênea no médio e baixo curso. Compreender essa bacia exige reconhecer que a paisagem não resulta apenas de processos naturais, nem somente das ações humanas. Ao longo do tempo, forças físicas e decisões sociais se entrelaçaram, moldando um sistema marcado por diferentes ritmos e intensidades de transformação. Nas últimas quatro décadas, esse entrelaçamento se acelerou: a expansão urbana de Manaus, intensificada desde meados dos anos 1980 pelo crescimento demográfico associado à Zona Franca de Manaus, reorganizou fluxos, alterou conexões e modificou a maneira como a bacia responde às perturbações. Partindo da hipótese de que os diferentes níveis de sensibilidade resultam da interação entre a resistência dos solos, a intensidade e a distribuição espacial das intervenções humanas e a sazonalidade fluvial, a pesquisa articula três eixos de análise: morfometria do relevo, avaliação de propriedades físicas dos solos (como resistência mecânica à penetração, infiltração e densidade) e interpretação multitemporal do uso e cobertura da terra entre 1984 e 2024. Com base nesse conjunto, foram elaborados mapas de sensibilidade em dois cenários complementares: um fundamentado em fatores naturais e outro que incorpora a intervenção humana. Desse modo, torna-se possível distinguir o potencial natural de resposta geomorfológica da bacia dos efeitos produzidos pela intensificação das pressões humanas. Os resultados indicam que a bacia se organiza como um mosaico de unidades com comportamentos contrastantes. Superfícies de menor declividade, formas divergentes e cobertura vegetal contínua tendem a amortecer perturbações, com respostas mais lentas e graduais. Em contrapartida, encostas íngremes, formas convergentes e setores de alta conectividade hidrossedimentar operam próximas a limiares funcionais, de modo que alterações pontuais podem desencadear respostas rápidas e intensas. As propriedades físicas dos solos reforçam essa diferenciação, revelando padrões coerentes segundo a organização morfoestrutural e os usos da terra. A leitura multitemporal evidencia que a paisagem se tornou mais heterogênea e menos capaz de amortecer impactos ao longo de quatro décadas, especialmente no médio e baixo curso da margem direita, onde expansão urbana, abertura de ramais, infraestrutura viária e grandes empreendimentos reconfiguraram a sensibilidade. A comparação entre os cenários demonstra que as intervenções humanas não criam sensibilidade do zero: elas a deslocam, ampliam e reorganizam no espaço. Conclui-se que a BHRP não pode ser lida nem como simples bacia urbana sob pressão, nem como espaço natural residual, mas como um sistema híbrido cuja singularidade reside na coexistência entre nascentes resguardadas por áreas de proteção nas cabeceiras e o avanço heterogêneo das pressões humanas ao longo do canal. A análise revela que as unidades de paisagem se organizam em dois tipos: as fixas, que persistem independentemente do ciclo hidrológico, e as efêmeras, que emergem e desaparecem com o pulso sazonal de cheias e vazantes, distinção essencial para compreender os diferentes limiares de sensibilidade do sistema e orientar o planejamento e a gestão ambiental em áreas amazônicas sob urbanização acelerada.

Palavras-chave: Sensibilidade da paisagem; Geomorfologia; Unidades de paisagem; Uso e ocupação da terra; Bacia Hidrográfica do Rio Puraquequara.

ABSTRACT

This work analyzes landscape sensitivity in the Puraquequara River Watershed (BHRP), in the eastern sector of Manaus, as a meaningful case for understanding the interaction between natural processes and human pressures in the urban Amazon. The choice of study area is justified not only by its location within an urban expansion zone, but by the combination of morpho-structural diversity, strong hydrological seasonality, high water-sediment connectivity, and the coexistence of landscape units with contrasting dynamics, tested by the flood-and-low-water pulse of the Amazonian hydrological regime. The BHRP stands out among the watersheds surrounding Manaus for bringing together, along a single gradient, headwaters embedded in protected primary forest, internal morphostructural diversity, and a heterogeneous front of cultivated areas, urbanization, industrialization, and infrastructure in the middle and lower course. Understanding this watershed requires acknowledging that the landscape results neither from natural processes alone, nor solely from human actions. Over time, physical forces and social decisions became intertwined, shaping a system marked by different rhythms and intensities of transformation. Over the past four decades, this intertwining has accelerated: the urban expansion of Manaus, intensified since the mid-1980s by demographic growth associated with the Zona Franca de Manaus free trade zone, reorganized flows, altered connections, and modified the way the watershed responds to disturbances. Starting from the hypothesis that different sensitivity levels result from the interaction between soil resistance, the intensity and spatial distribution of human interventions, and fluvial seasonality, the research articulates three analytical axes: relief morphometry, evaluation of soil physical properties (mechanical resistance to penetration, infiltration rates, and bulk density) and multitemporal interpretation of land use and land cover between 1984 and 2024. Based on this framework, sensitivity maps were produced for two complementary scenarios: one grounded in natural factors and another incorporating human intervention. This approach allows distinguishing the watershed's natural geomorphological response potential from the effects produced by the intensification of human pressures. The results indicate that the watershed is organized as a mosaic of units with contrasting behaviors. Lower-slope surfaces, divergent landforms, and continuous vegetation cover tend to buffer disturbances, yielding slower and more gradual responses. In contrast, steep slopes, convergent forms, and sectors of high hydrosedimentary connectivity operate close to functional thresholds, such that localized changes can trigger rapid and intense responses. Soil physical properties reinforce this differentiation, revealing coherent patterns according to morphostructural organization and predominant land uses. The multitemporal reading shows that the landscape has become more heterogeneous and less capable of buffering impacts over four decades, especially in the middle and lower course of the right bank, where urban expansion, opening of branch roads, road infrastructure, and large-scale developments have reconfigured the spatial distribution of sensitivity. The comparison between scenarios demonstrates that human interventions do not create sensitivity from scratch: they displace, amplify, and reorganize it across space. It is concluded that the BHRP cannot be read either as a simple urban watershed under pressure, or as a residual natural space, but as a hybrid system whose singularity lies in the coexistence between headwaters sheltered by protected areas and the heterogeneous advance of human pressures along the channel. The analysis reveals that landscape units are organized into two types: fixed units, which persist regardless of the hydrological cycle, and ephemeral units, which emerge and disappear with the seasonal flood-and-low-water pulse, a distinction essential for understanding the system's different sensitivity thresholds and for guiding environmental planning and management in Amazonian areas under accelerated urbanization.

Keywords: Landscape sensitivity; Geomorphology; Landscape units; Land use and land cover; Puraquequara River Watershed.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Síntese da abordagem conceitual adotada na tese	34
Figura 2 - Mapa de localização da BHRP	70
Figura 3 - Mapa geológico compilado do Serviço Geológico do Brasil (CPRM)	73
Figura 4 - Perfil longitudinal e setorização geomorfológica	75
Figura 5 - Distribuição espacial das unidades geomorfológicas	77
Figura 6 - Rede de drenagem da BHRP	79
Figura 7 - Ria de foz afogada	82
Figura 8 - Climatograma pluviométrico mensal (2016–2025)	84
Figura 9 - Distribuição espacial das classes de solo	86
Figura 10 - Cobertura e tipologias de vegetação	89
Figura 11 - Vista do dossel florestal na RFAD	90
Figura 12 - Abertura da Estrada do Puraquequara (década de 1970)	94
Figura 13 - Placa de sinalização da Área de Expansão do Distrito Industrial	95
Figura 14 - Estrutura metodológica para análise da sensibilidade da paisagem	99
Figura 15 - Etapas de aquisição da imagem FABDEM	101
Figura 16 - Registros de campo: (A) feito dia 19/11/2022; (B) feito dia 23/08/2025	106
Figura 17 - Tratamento das imagens em laboratório	108
Figura 18 - Perfil esquemático do transecto A–B e distribuição textural dos solos	119
Figura 19 - Distribuição média das frações granulométricas por unidade geomorfológica e margem	121
Figura 20 - Densidade do solo média por unidade geomorfológica e margem	125
Figura 21 - Distribuição da densidade de partículas (D_p) por unidade geomorfológica e margem	127
Figura 22 - Transecto A–B, localização dos pontos de infiltração (P1–P6) e classes de taxa média de infiltração	128
Figura 23 - Curvas de taxa de infiltração – Margem Direita (P1–P3)	130
Figura 24 - Curvas de taxa de infiltração – Margem Esquerda (P4–P6)	131
Figura 25 - Curvas de taxa de infiltração, P7 – Margem Direita	131
Figura 26 - Relação entre PT (%) e taxa quase-estável de infiltração ($\text{mm}/\text{min}^{-1}$)	133
Figura 27 - Relação entre argila (%) e taxa quase-estável de infiltração ($\text{mm}/\text{min}^{-1}$)	134
Figura 28 - Transecto A–B, localização dos pontos de resistência do solo (P1–P6)	135
Figura 29 - Perfis verticais da resistência à penetração (RP, MPa) - margem direita	136

Figura 30 - Perfis verticais da resistência à penetração (RP, MPa) - margem esquerda	137
Figura 31 - Perfis verticais da resistência à penetração (RP, MPa) - margem direita	138
Figura 32 - Mapa altimétrico da BHRP	141
Figura 33 - Perfis transversais do vale do rio Puraquequara (alto, médio e baixo curso)	144
Figura 34 - Mapa de declividade da BHRP	146
Figura 35 - Mapa de forma das encostas da BHRP	148
Figura 36 - Mapa de orientação das vertentes da BHRP	151
Figura 37 - Mapas de uso e ocupação da terra	157
Figura 38 - Voçoroca BI-2: margem esquerda da BHRP	159
Figura 39 - Voçoroca BI-3: margem esquerda da BHRP	160
Figura 40 - Extensão da área de contribuição das Voçorocas A) BI-2 e B) BI3.	162
Figura 41 - Vista panorâmica da Vila do Puraquequara	163
Figura 42 - Voçorocas efêmeras (surgem na vazante do rio).....	164
Figura 43 - Unidades da paisagem móveis: restingas efêmeras	165
Figura 44 - Unidades de paisagem móveis: ilhas efêmeras.....	165
Figura 45 - Trecho do rio Puraquequara, na região de várzea amazônica, ilustrando as variações sazonais entre os períodos de cheia e seca	166
Figura 46 - Mapa de Sensitividade da Paisagem: fatores naturais	169
Figura 47 - Mapa de Sensitividade da Paisagem: fatores humanos	171

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Síntese granulométrica média (0–100 cm) por unidade geomorfológica e margem	120
Tabela 2 - Densidade do solo (Ds) por unidade geomorfológica e margem.....	124
Tabela 3 - Densidade de partículas (Dp) por unidade geomorfológica e margem.....	127
Tabela 4 - Síntese das taxas de infiltração por unidade geomorfológica e margem (pontos P1–P6).....	129
Tabela 5 - Infiltração quase estável, argila e porosidade total por ponto (P1–P6).....	133

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Trabalhos em que Brunsden e Thornes figuram como autores ou coautores.....	41
Quadro 2 - Textura e cor dos perfis de solo por margem	122
Quadro 3 - Distribuição das principais unidades territoriais na BHRP.....	153
Quadro 4 - Síntese das unidades de paisagem analisadas	173

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BHRP – Bacia Hidrográfica do Rio Puraquequara

MDE – Modelo Digital de Elevação

PDUAM – Plano Diretor Urbano e Ambiental de Manaus

RMM – Região Metropolitana de Manaus

SIG – Sistema de Informações Geográficas

SR – Sensoriamento Remoto

UPBP – Unidade de Paisagem da Bacia do Puraquequara

VANT – Veículo Aéreo Não Tripulado

ZFM – Zona Franca de Manaus

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	20
1. A PAISAGEM EM CONSTANTE MUDANÇA	24
1.1. A PAISAGEM ANTES DA GEOMORFOLOGIA	26
1.2. A PAISAGEM NA GEOGRAFIA MODERNA.....	27
1.3. VISÕES MORFOLÓGICA E FISIOLÓGICA DA PAISAGEM	29
1.4. A PAISAGEM SOB OLHAR GEOMORFOLÓGICO ATUAL	30
1.5. GEOSSISTEMA, UNIDADES E ANÁLISE INTEGRADA.....	33
1.6. SENSITIVIDADE E DINÂMICA GEOMORFOLÓGICA.....	36
1.7. SENSITIVIDADE DA PAISAGEM: ORIGEM	40
1.7.1. Trabalhos-chave anteriores a 1979.....	42
1.7.2. Geomorphology and time: preparação para 1979	43
1.8. AVANÇOS CONCEITUAIS E METODOLÓGICOS	44
1.8.1. Da teoria à quantificação.....	44
1.8.2. Ação humana como modulador-chave.....	45
1.8.3. Categorias intermediárias e modelos computacionais	45
1.8.4. Paisagens encadeadas, sensibilidades interligadas.....	46
1.8.5. Refinando o conceito e explorando escalas	46
1.8.6. Sistemas fluviais: laboratórios naturais.....	47
1.8.7. Ação humana e natureza em constante evolução.....	47
1.8.8. Outros ambientes: zonas costeiras, turfeiras, vegetação	48
1.9. APLICAÇÃO DA SENSITIVIDADE DA PAISAGEM NO BRASIL	48
1.10. ESTUDOS SOBRE A BACIA DO RIO PURAQUEQUARA	49
1.10.1. Mudanças no uso e cobertura da terra (2005-2016).....	50
1.10.2. Identificação das áreas de risco e ocupação desordenada.....	52
1.10.3. Características físicas e morfométricas da bacia.....	56
1.10.4. Usos múltiplos da água e recursos hídricos	58
1.10.5. Planejamento, conservação e conflitos de uso	61
1.11. RELAÇÃO ENTRE OS ESTUDOS E TESE PROPOSTA	63
2. CONDICIONANTES NATURAIS E HUMANOS	69
2.1. LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA E EXTENSÃO TERRITORIAL.....	69
2.2. CONTEXTO GEOLÓGICO	72
2.3. ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS	74
2.4. SISTEMA HIDROGRÁFICO	78
2.5. CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS	82
2.6. CARACTERÍSTICAS PEDOLÓGICAS	85

2.7.	COBERTURA VEGETAL	88
2.8.	PRESSÕES HUMANAS E MUDANÇAS AMBIENTAIS	91
2.8.1.	Urbanização e reconfiguração espacial.....	92
3.	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	98
3.1.	FLUXOGRAMA DAS ETAPAS METODOLÓGICAS	98
3.2.	BASE CARTOGRÁFICA E DELIMITAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PURAQUEQUARA	100
3.2.1.	Critérios de seleção e preparo do Modelo Digital de Elevação (FABDEM)	100
3.2.2.	Extração dos limites da BHRP e da rede de drenagem.....	102
3.2.3.	Perfil longitudinal e setorização geomorfológica	103
3.3.	PROCEDIMENTOS PARA CARACTERIZAR A VARIABILIDADE ESPACIAL DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DOS SOLOS NAS UNIDADES DE PAISAGEM DA BHRP	104
3.3.1.	Desenho amostral e critérios de seleção dos pontos	104
3.3.2.	Coleta de amostras e ensaios de campo	105
3.3.3.	Tratamento e análises laboratoriais.....	107
3.4.	PROCEDIMENTOS PARA AVALIAR A INTENSIDADE E A DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS INTERVENÇÕES HUMANAS	109
3.4.1.	Base de dados e imagem	109
3.4.2.	Pré-processamento e classificação do uso e cobertura da terra	110
3.4.3.	Produtos cartográficos e métricas espaciais.....	110
3.5.	PROCEDIMENTOS PARA INTERPRETAR A CONFIGURAÇÃO ESPACIAL DAS ÁREAS ASSOCIADAS A DIFERENTES NÍVEIS DE SENSIBILIDADE	111
3.5.1.	Base de dados e variáveis geomorfológicas.....	111
3.5.2.	Controle morfológico.....	112
3.5.3.	Bloco B – Controle hidrológico e concentração de fluxos	112
3.5.4.	Bloco C – Conectividade geomorfológica	113
3.5.5.	Integração dos blocos e produção dos mapas finais	114
3.5.6.	Validação e checagem dos produtos.....	114
4.	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	117
4.1.	CARACTERIZAÇÃO DA VARIABILIDADE ESPACIAL DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO	118
4.1.1.	Caracterização geral dos solos da bacia.....	119
4.1.1.1.	<i>Classes texturais e granulometria</i>	<i>120</i>
4.1.1.2.	<i>Densidade do solo e porosidade.....</i>	<i>123</i>
4.1.1.3.	<i>Densidade de partículas</i>	<i>126</i>
4.1.2.	Dinâmica hídrica	128

4.1.2.1.	<i>Infiltração</i>	129
4.1.2.2.	<i>Porosidade e infiltração</i>	132
4.1.3.	Resistência mecânica dos solos.....	135
4.1.3.1.	<i>Penetração e resistência à compactação</i>	135
4.1.3.2.	<i>Implicações geomorfológicas</i>	139
4.2.	A INTENSIDADE E A ESPACIALIZAÇÃO DAS INTERVENÇÕES HUMANAS NAS UNIDADES DE PAISAGEM DA BHRP	140
4.2.1.	Análise morfoestrutural e predisposição geomorfológica à intervenção humana.....	140
4.2.2.	Organização espacial e dinâmica da paisagem na BHRP	152
4.2.3.	Dinâmica temporal do uso e ocupação da terra (1984–2024).....	156
4.2.4.	Unidades de paisagem e sensibilidade geomorfológica na BHRP	158
4.3.	INTERPRETAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL E DA CONFIGURAÇÃO DAS ÁREAS DE DIFERENTES NÍVEIS DE SENSITIVIDADE DA PAISAGEM NA BHRP	168
	CONSIDERAÇÕES FINAIS	176
	REFERÊNCIAS	179

INTRODUÇÃO

A expressão *naturalmente complexa, nitidamente fragmentada*, presente no título desta tese, não nasceu de um exercício retórico. Ela sintetiza uma tensão concreta, observada em campo, percebida nos dados e confirmada ao longo da análise: a Bacia Hidrográfica do Rio Puraquequara (BHRP) é, ao mesmo tempo, um dos sistemas fluviais mais intrincados do entorno de Manaus e um dos mais visivelmente recortados pelas forças da urbanização. Complexidade e fragmentação não são aqui sinônimos: são forças em disputa. E é justamente da tensão entre elas que emerge a questão central deste trabalho.

Para compreender a dimensão dessa tensão, basta percorrer a bacia de montante a jusante. Nas cabeceiras, a floresta primária da Reserva Florestal Adolpho Ducke e a extensa área sob administração militar (que ocupa mais de 54% da área total da bacia) mantêm um contínuo florestal raro para um sistema inserido no perímetro urbano de uma cidade com mais de dois milhões de habitantes. Na margem direita, o cenário muda de forma abrupta: ramais abertos sobre lateritas, galpões industriais avançando sobre a mata, bairros irregulares pressionando os fundos de vale e o traçado do Rodoanel Metropolitano redesenhando, silenciosamente, a geometria dos fluxos hidrossedimentares. Não existe outra bacia do entorno de Manaus que reúna, num mesmo gradiente, essa combinação.

A essa singularidade territorial soma-se uma complexidade organizacional igualmente expressiva. O rio Puraquequara funciona como eixo de convergência de dezenas de cursos fluviais: ao todo, convergem e se reconfiguram as águas oriundas de 84 cursos fluviais de múltiplas ordens, compondo um labirinto de relações hidrológicas que já seria, por si só, objeto de análise. Classificada como bacia de sexta ordem, a BHRP expressa uma complexidade intermediária, materializada tanto na extensão de sua rede de drenagem quanto na variedade de conexões entre interflúvios, vales, vertentes e canais. Ainda que predomine o padrão dendrítico, há segmentos em que se observa tendência de orientação NE–SW nos afluentes da margem esquerda, indicando que a bacia, longe de ser morfológicamente homogênea, resulta da combinação entre relativa regularidade e controles localizados.

Essa complexidade natural, contudo, não pode ser confundida com estabilidade plena. Paisagens robustas também abrigam pontos de fragilidade, descontinuidades e limiares, sobretudo quando processos naturais e pressões sociais passam a operar de forma combinada. É por isso que, neste trabalho, a paisagem é assumida como uma realidade integrada e dinâmica,

mobilizada no âmbito da geomorfologia para compreender como formas, materiais, fluxos e usos do território se articulam no tempo e no espaço (Conti, 2014). Nessa perspectiva, separar rigidamente o que seria "natural" do que seria "humano" empobrece a análise, porque encobre os mecanismos pelos quais a sociedade reorganiza o relevo, a drenagem e os caminhos de circulação de água e sedimentos (Cassetti, 1995). Na BHRP, essa separação seria simplesmente falsa: a bacia que existe hoje é, em parte, produto de quatro décadas de decisões territoriais que alteraram sua geometria funcional.

A escolha da BHRP ganha força adicional quando observada à luz do processo recente de urbanização de Manaus. A literatura em geomorfologia tem destacado que a intensificação das atividades humanas acelera e amplifica as marcas sobre os sistemas naturais, com um salto qualitativo particularmente visível nas últimas décadas, quando mudanças demográficas, tecnológicas e políticas reconfiguram tanto os processos quanto a capacidade de observá-los (Goudie, 2018; Goudie et al., 2022; Marques Neto, 2009). Na BHRP, esse processo tem um marco temporal preciso. A criação da Zona Franca de Manaus, em 1967, e o crescimento demográfico explosivo que se seguiu (Silva e Scudeller, 2022) redefiniram a lógica de ocupação dos vetores leste–norte–nordeste da cidade, rebatendo diretamente sobre bacias que drenam o perímetro urbano, entre elas o Puraquequara (Fonseca, 2008). Na bacia, esse processo não produziu uma ocupação homogênea, mas um mosaico de pressões territorialmente desiguais, composto por ocupações populares, atividades industriais e agroindustriais, agricultura familiar e usos portuários distribuídos de forma assimétrica entre as duas margens (Miranda, 2017).

É nesse contexto que a sensibilidade da paisagem se mostra um conceito particularmente fértil. Proposto por Brunsden e Thornes (1979) e progressivamente refinado pela literatura geomorfológica internacional, ele permite interpretar a bacia não apenas em termos de risco ou degradação, mas como sistema em ajuste, capaz de reorganizar-se diante de perturbações, dentro de limites que variam segundo a composição, a forma e a conectividade de cada unidade. Importa sublinhar que sensibilidade não é sinônimo de instabilidade: ela expressa a tendência de um sistema geomorfológico a reagir a oscilações e a capacidade, ou incapacidade, de se reorganizar frente a perturbações. Na BHRP, maior sensibilidade não significa necessariamente colapso, mas menor margem de erro diante das intervenções e maior rapidez de resposta quando certos limiares funcionais são ultrapassados.

A especificidade do Puraquequara também se revela no modo como o tempo opera dentro da bacia. Mais do que pano de fundo cronológico, a temporalidade aparece como chave interpretativa do funcionamento paisagístico em duas dimensões distintas. De um lado, há o

tempo histórico da urbanização, da abertura de vias, da instalação de infraestruturas e da reconfiguração do uso e cobertura da terra, especialmente entre 1984 e 2024. De outro, há o tempo cíclico da hidrologia amazônica, em que cheias e vazantes atuam como um teste periódico das capacidades adaptativas das unidades de paisagem, revelando limiares que a estação seca encobre. É precisamente nesse ponto que a bacia ganha interesse analítico adicional: suas unidades não respondem de maneira uniforme às mudanças, pois articulam componentes fixos, que persistem independentemente do ciclo hidrológico, e componentes efêmeros, que emergem e desaparecem com o pulso sazonal.

Diante desse quadro, esta tese parte da hipótese de que a BHRP apresenta diferentes níveis de sensibilidade geomorfológica, condicionados pela resistência dos solos, pela intensidade e distribuição espacial das intervenções humanas e pela sazonalidade fluvial. O objetivo geral consiste em analisar os níveis de sensibilidade das Unidades de Paisagem da bacia do Puraquequara. Para isso, buscou-se: (1) caracterizar a variabilidade espacial das propriedades físicas dos solos nas unidades de paisagem da BHRP; (2) avaliar a intensidade e a distribuição espacial das intervenções humanas nessas unidades; e (3) interpretar a configuração espacial das áreas associadas a diferentes níveis de sensibilidade. A tese está organizada em quatro capítulos. O Capítulo 1 reconstrói o percurso conceitual da paisagem na Geografia e na Geomorfologia, culminando no conceito de sensibilidade e no estado da arte de sua aplicação no Brasil. O Capítulo 2 caracteriza os condicionantes naturais e humanos da BHRP. O Capítulo 3 descreve os procedimentos metodológicos, da base cartográfica aos protocolos de campo e à produção dos mapas. O Capítulo 4 apresenta e discute os resultados, articulando propriedades dos solos, evolução do uso e cobertura da terra e interpretação espacial dos níveis de sensibilidade. As considerações finais retomam a hipótese à luz do que foi encontrado.

Mais do que produzir uma leitura descritiva da área, este trabalho procura mostrar por que o Puraquequara importa. A BHRP não deve ser lida apenas como espaço natural remanescente, nem como simples bacia urbana sob pressão, mas como um sistema híbrido no qual natureza e sociedade se entrelaçam de forma indissociável, gerando respostas diferenciadas no território e exigindo abordagens capazes de integrar relevo, materiais, fluxos, usos da terra e temporalidades distintas. Nessa direção, a análise da sensibilidade da paisagem ultrapassa o interesse estritamente acadêmico: ela oferece um diagnóstico aplicável ao planejamento, à conservação e ao manejo, sobretudo em paisagens amazônicas submetidas à urbanização acelerada, nas quais a incapacidade de reconhecer limiares, conectividades e diferenças internas pode transformar respostas naturais em crises geomorfológicas.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A Sensitividade da Paisagem é um conceito que pode ser usado para entender os processos dinâmicos da bacia hidrográfica do rio Puraquequara, especialmente as mudanças que acontecem no ciclo anual das cheias e vazantes.

Discussão durante atividade em campo com o prof. Dr. Antonio Fábio Sabbá Guimarães Vieira, nov./2022.

1. A PAISAGEM EM CONSTANTE MUDANÇA

Uma revisão da literatura não se resume a uma mera compilação do que já foi publicado sobre determinado tema. Na verdade, trata-se, principalmente, de um exercício de síntese crítica e de construção estruturada do conhecimento. Portanto, este capítulo foi concebido não apenas para fundamentar teoricamente a questão central deste trabalho, a análise da sensibilidade das unidades de paisagem da BHRP, mas também para explicitar os caminhos e, por que não, as dúvidas que permeiam a relação entre conceito e objeto. Afinal, seria possível compreender a complexidade da bacia do Puraquequara a partir de modelos rígidos e compartimentalizados? Ou não seria justamente a integração, com todas as suas ambivalências, o fundamental desafio enfrentado pelo pesquisador contemporâneo?

Este trabalho enfrenta tais indagações por meio de uma leitura integradora, ancorada na visão geossistêmica e estruturada pela comparação entre Unidades de Paisagem. A sensibilidade é entendida como a propriedade emergente que expressa o modo pelo qual o sistema responde a perturbações de diferentes naturezas e intensidades.

O conceito de Sensibilidade da Paisagem ocupa posição central nesta construção teórica. Ele é sustentado por fundamentos clássicos da Geomorfologia, como a relação forma-processo, o equilíbrio dinâmico dos sistemas morfogenéticos e a magnitude e frequência dos eventos geodinâmicos, articulados às Unidades de Paisagem. Estas são compreendidas não como meros instrumentos analíticos, mas como categorias operacionais que permitem interrogar o espaço e suas transformações (Dantas *et al.*, 2015; Silva *et al.*, 2023; Lopes *et al.*, 2024).

Assim, a paisagem é tratada como uma totalidade integrada, dotada de complexidade e historicidade, cuja leitura se apoia na perspectiva geossistêmica. Embora se reconheçam as dimensões socioespaciais inerentes à produção da paisagem, a ênfase analítica recai sobre sua dimensão física e sua interface com a Geomorfologia, sem perder de vista as interações que as vinculam aos processos sociais de uso e ocupação do território.

O conceito de paisagem, na Geografia, foi moldado ao longo do tempo por distintas tradições e escolas de pensamento. Sua história é marcada por disputas epistemológicas entre o físico e o simbólico, o descritivo e o processual, a natureza e a cultura. Um marco desse trajeto é Hutton (1785), cuja teoria do uniformitarismo e do ciclo das rochas forneceu suporte crucial para ver a paisagem como resultado de processos geológicos profundos e, diga-se, lentos (o que, por si só, já coloca em xeque certa ânsia pela explicação imediata).

As ideias de Hutton motivaram abordagens posteriores, tanto de geógrafos de vertente física quanto de autores culturais e humanistas. No primeiro grupo, Humboldt e Troll ajudaram a consolidar uma visão empírica e metodológica da paisagem física; no segundo, Ratzel, Vidal de la Blache, Sauer e Cosgrove exploraram a paisagem enquanto construção simbólica (Schier, 2003). Bertrand, ofereceu uma síntese contemporânea, integrando componentes físico-naturais e socioespaciais (Bertrand, 2004). Porém (e aqui está a ironia), por mais que a paisagem seja disputada entre tantas correntes, permanece irreduzível à lógica de qualquer uma delas.

A ênfase desta tese recai sobre a dimensão física da paisagem. Isso não significa ignorar os processos sociais que a moldam, nem adotar uma separação rígida entre natureza e sociedade, postura que a própria tradição geossistêmica há muito recusou. Significa, antes, reconhecer que a Geomorfologia exige atenção simultânea às formas, aos processos e aos materiais que constituem a paisagem. Descrevê-la a partir do que se oferece ao olhar imediato não é suficiente: compreendê-la implica investigar as inter-relações que articulam relevo, solos, águas, cobertura vegetal e ação humana ao longo do tempo.

Foi justamente essa exigência que impulsionou uma das inflexões mais decisivas no interior da Geomorfologia: o deslocamento do foco da descrição das formas para a análise dos processos que as produzem, remodelam e, em certos casos, desestabilizam (White, 1945). No século XX, esse movimento se aprofundou quando a paisagem passou a ser pensada como sistema dinâmico, em que entradas e saídas de matéria e energia se articulam por mecanismos de retroalimentação. Estabilidade e mudança deixaram de ser termos excludentes e passaram a ser faces de um mesmo processo contínuo.

A perspectiva geossistêmica, nesse sentido, mostra-se particularmente útil. Tomar o geossistema como unidade funcional da paisagem significa admitir que as fronteiras entre o que chamamos de natural e o que reconhecemos como social são, na prática, porosas. Como aponta Christofolletti (1999), a intensificação da interação entre atividades humanas e meios naturais torna o elemento social componente indissociável da paisagem, com desdobramentos diretos sobre os processos geomorfológicos. As Unidades de Paisagem, portanto, não são apenas divisões cartográficas: são módulos analíticos em que formas, materiais, fluxos e usos do território se combinam de maneira relativamente coerente e identificável.

Vale, aqui, uma distinção que este trabalho toma a sério: sensibilidade não é o mesmo que sensibilidade. A sensibilidade, em seu sentido mais corrente, remete à percepção. A sensibilidade diz respeito ao modo como um sistema reage a perturbações e à sua capacidade de se reorganizar diante de mudanças. Nesta tese, ela não é tratada como sinônimo de instabilidade

ou risco, mas como uma propriedade que emerge da interação entre materiais, formas, conectividade e pressões sociais. Na BHRP, essa leitura se organiza em torno de três eixos: a resistência dos solos, a intensidade das intervenções humanas e a sazonalidade fluvial.

É a partir dessa base que o capítulo avança. O objetivo não é reconstituir linearmente a história do conceito de paisagem, mas mostrar como certas inflexões teóricas tornaram possível interpretá-la como totalidade integrada, historicamente produzida e geomorfologicamente responsiva. Esse é o fio que conduz, nos tópicos seguintes, tanto a discussão sobre a origem e os avanços do conceito de sensibilidade quanto sua aplicação ao caso da BHRP.

1.1. A PAISAGEM ANTES DA GEOMORFOLOGIA

Inspirada no título do artigo de Montgomery (2017), esta seção analisa como a paisagem era interpretada antes da consolidação da Geomorfologia. Trata-se da compreensão da paisagem pré-científica, analisada perante distintas perspectivas (filosófica, estética, empírica e religiosa) que anteciparam discussões básicas sobre processos, formas e mudanças do espaço natural.

Antes que a Geomorfologia se radicasse como campo disciplinar autônomo, o conceito de paisagem foi sendo paulatinamente gestado no interior da Geografia e de outros domínios do conhecimento. Suas origens, de fato, localizam-se fora dos limites estritos das ciências, a exemplo da pintura renascentista e da literatura, quando “paisagem” designava primordialmente aquilo que se podia abarcar com o olhar, uma vista ou panorama dotados de qualidades estéticas (Rees, 1973; Montgomery, 2017; Baldin, 2021). Tal acepção, de natureza eminentemente visual e estética, dominou até tempos relativamente recentes, manifestando-se em representações artísticas e descrições literárias, muito antes de se firmar como noção geográfica. Bailly (1991), nesse sentido, chegou a definir paisagem como a parte visível do espaço terrestre, ressaltando essa associação fundadora com a percepção visual. Somente com a emergência da Ciência Geográfica, sobretudo no século XIX, é que a paisagem assume os contornos de um conceito de análise, passando a ser concebida como o conjunto de fatores naturais e humanos percebidos em determinado recorte espacial, integrados em uma combinação própria (Krebs, 2014; Porada e Zachariasz, 2019; Gyurkovich e Pieczara, 2021; Quesada-García, 2021).

1.2. A PAISAGEM NA GEOGRAFIA MODERNA

Os geógrafos modernos que, de modo explícito, incorporaram o conceito de paisagem ao instrumental científico o fizeram sob influência do positivismo e da busca por uma síntese das características da superfície terrestre. Nesse contexto, Humboldt (1845) destaca-se como figura seminal: já no final do século XVIII e início do XIX, suas descrições de diferentes regiões fundamentavam-se na fisionomia da vegetação e em demais atributos naturais, na tentativa de identificar regularidades e diferenças espaciais. A análise da cobertura vegetal servia, assim, como critério para a delimitação e comparação de distintos recortes espaciais, evidenciando um método ao mesmo tempo explicativo e comparativo (Maximiano, 2004). Tal procedimento, que pode ser rotulado como empirismo raciocinado, articulava a percepção sensorial da paisagem com a observação metódica de seus elementos e a aplicação da lógica na busca por explicações causais (Pedras, 2000; Cene e Vitte, 2009; Vitte e Silveira, 2010; Carvalho, 2018). Portanto, Humboldt (1845) inaugurou uma leitura holística da paisagem, ao integrar diferentes dimensões da natureza (relevo, clima, vegetação, entre outras) e, não raro, fatos relacionados à presença e à ação humana, dando ao conhecimento geográfico uma sistematicidade única em suas análises.

Na esteira dos trabalhos de Humboldt, Ritter (1865), também geógrafo alemão, exerceu influência sobre a consolidação do conceito de paisagem, embora seu papel tenha sido de menor centralidade. Ritter (1865) situava a paisagem dentro de um quadro de referência enciclopédico e histórico, valorizando descrições regionais de caráter comparativo (perspectiva denominada 'geografia comparada'), por meio da qual articulava fenômenos naturais e humanos em relação a regiões específicas (Claval, 2004; Besse, 2006; Ferreira, 2010; Lima *et al.*, 2021). Para Ritter, a paisagem não constituía o eixo central de análise, mas representava um método de registro e organização de dados referentes a distintas áreas do globo terrestre, traduzindo um positivismo de natureza dinâmica e histórica. Todavia, a preocupação em reunir informações relativas ao relevo, aos solos, à vegetação, ao povoamento e a outras propriedades do território, compondo uma síntese coerente, já demonstrava convergência com um ponto de vista ainda rudimentar de investigação sobre a 'paisagem' de cada localidade. (Claval, 2004; Besse, 2006; Souza, 2022).

No final do século XIX, Ratzel (1909) exerceu influência decisiva sobre o pensamento geográfico, particularmente no que tange à compreensão do conceito de paisagem. Embora sua notoriedade esteja frequentemente associada ao determinismo ambiental, a noção de *Landschaft* (paisagem) em Ratzel revela matizes relevantes: para o autor, a paisagem constituía-se a partir das interações entre elementos naturais considerados fixos (como solos, relevo e cursos d'água)

e elementos móveis, com destaque para as populações humanas. Dessa maneira, Ratzel (1909) compreendia a paisagem como o resultado do distanciamento do espírito humano do meio natural, evidenciando, assim, a dialética entre natureza e cultura. Esse afastamento propiciava o surgimento de uma cultura dotada de relativa autonomia em face das determinações naturais, delineando uma abordagem menos rigidamente determinista do que geralmente se atribui a Ratzel. Em função dessa influência, geógrafos alemães do início do século XX desenvolveram a chamada *Landschaftskunde* (uma ciência das paisagens), segundo a qual a Geografia teria, como objeto central, o estudo das paisagens terrestres em sua dimensão territorial. Sob tal perspectiva, a paisagem era concebida como expressão espacial das estruturas naturais, regida por leis observáveis e suscetível de ser classificada em unidades distintas.

Entre os geógrafos alemães do período, Schlüter (1906) destacou-se ao defender que a paisagem deveria constituir o objeto central da Geografia, estabelecendo a distinção entre *Landschaft original* (paisagem natural, isenta de interferências antrópicas) e *Kulturlandschaft* (paisagem cultural, resultante das mudanças promovidas pela ação humana). Para Schlüter, a unidade disciplinar da Geografia residiria justamente na articulação das forças naturais e das intervenções humanas na configuração das paisagens (Leighly e Speth, 1995; Seemann, 2004; Vitte, 2007). Tal entendimento, ao postular a paisagem como síntese do natural e do humano, cooperou para a afirmação do conceito como eixo estruturador da ciência geográfica emergente. Em paralelo, na França, Paul Vidal de La Blache empregou expressões afins (*pays* e *paysage*), apreciando o aspecto visual e a dimensão regional: para La Blache, a paisagem seria aquilo que se revela ao olhar em determinada região, fruto das interações entre as energias depositadas pela natureza e o trabalho humano que as mobiliza (Fabrício e Vitte, 2011; Carneiro, 2012). Seu enfoque, centrado no gênero de vida dos povos e na análise da região concreta, pressupunha que a paisagem exprimia tanto as potencialidades naturais quanto as escolhas culturais de cada sociedade (Maximiano, 2004; Silva, 2025).

Ao longo do século XIX e nas primeiras décadas do XX, a paisagem consolidou-se como categoria integradora no âmbito da Geografia, sendo ora interpretada como a reunião de fenômenos naturais em determinada área, ora como o resultado da confluência entre os elementos naturais e as formas de intervenção social (Schier, 2003; Maria, 2016). Trata-se de uma fase 'pré-geomorfológica' do conceito, marcada por forte tendência descritiva e estática, sob clara influência do positivismo naturalista. Na tradição alemã, predominava a preocupação em classificar e delimitar unidades espaciais a partir dos componentes físicos, tais como clima, relevo e vegetação, evidenciando um olhar morfológico e taxonômico sobre a paisagem (Fierz, 2008).

A escola francesa, apesar de igualmente ancorada no positivismo, conferia maior valor à historicidade dos processos, enxergando a paisagem não somente como uma configuração espacial, mas como expressão de transformações naturais e sociais em curso (Fabrício e Vitte, 2011). Essas distinções de abordagem (entre uma leitura estática e uma dinâmica) abreviavam caminhos analíticos distintos para o estudo das paisagens.

1.3. VISÕES MORFOLÓGICA E FISIOLÓGICA DA PAISAGEM

A literatura geográfica indica que, desde sua formulação como conceito científico, a paisagem foi abordada por dois caminhos principais: o morfológico e o fisiológico. No primeiro caso, a ênfase recai sobre os aspectos visíveis e formais, ou seja, na disposição espacial dos fenômenos, o que se origina tanto da influência da Estética quanto do exercício da observação empírica. Humboldt (1845), conforme já discutido, recorria às impressões visuais associadas ao raciocínio causal para explicar a organização das paisagens. Posteriormente, Carl Sauer, destacado integrante da escola de Berkeley, reforçou o método morfológico ao propor uma divisão da paisagem em dois grandes componentes: de um lado, o substrato físico-natural; de outro, as marcas culturais impressas pela ação humana (Silva, 2007). Para Sauer (1963), a paisagem resultava da combinação dos recursos naturais e da intervenção humana sobre eles, de modo que caberia à Geografia realizar uma síntese morfológica dessas características. Tal perspectiva privilegiava a comparação entre as diferentes formas produzidas pela interação entre natureza e cultura, estabelecendo o método morfológico de síntese (Corrêa, 2014). Este último tendia a conferir à paisagem um caráter estático, ao propor o agrupamento e a ordenação dos fenômenos enquanto formas coexistentes, mapeando sua distribuição e estrutura para, então, proceder à comparação entre distintas regiões.

Em embate, a perspectiva fisiológica, entendida aqui como referência ao funcionamento orgânico, propõe que a paisagem se assemelha a um organismo vivo, composto por fatores que interagem funcionalmente entre si (Rodriguez, 2019; Bezerra e Oliveira, 2025). Tal abordagem, influenciada pelos avanços da Biologia e pela emergência da noção de ecossistema, entende a paisagem como portadora de *funções vitais* e dinâmicas próprias. Geógrafos alinhados a essa concepção (notadamente alguns franceses e russos do início do século XX) defendiam que o papel da Geografia ultrapassava a mera descrição do que é imediatamente visível, exigindo a investigação das inter-relações não aparentes, isto é, o exame do conjunto de elementos que

compõem a superfície terrestre, seu entrelaçamento e sua evolução temporal (Moura-Fé, 2015). Esse ponto de vista antecipa a formulação da paisagem como sistema integrado, perspectiva posteriormente desenvolvida nos conceitos de Geossistema ou Ecossistema Geográfico. Nas palavras de Bobek e Schmithüsen (1998), trata-se de uma abordagem segundo a qual cabe à Geografia ir além da observação e descrição do aparente, buscando captar as conexões internas e os processos subjacentes que ajustam a paisagem, inclusive suas mudanças ao longo do tempo.

Antes da consolidação da Geomorfologia como disciplina, o conceito de paisagem, no âmbito da Geografia, oscilava entre duas perspectivas: uma voltada para a forma visível e para a síntese espacial dos elementos, e outra centrada na função, na interação e na dinâmica entre os componentes naturais e humanos. Apesar das diferenças, ambas convergiam para uma ideia: a paisagem emerge da relação entre natureza e sociedade. Mesmo entre os geógrafos físicos daquele período, era reconhecido que dificilmente se encontraria uma paisagem absolutamente “virgem” de intervenção humana, pois, conforme se observa, a paisagem, enquanto conceito, não é apenas um fato natural; ela deve incluir a existência humana (Felicio, 2021). Essa concepção integradora, ainda que, nos estudos clássicos, nem sempre tenha havido equilíbrio na consideração dos fatores físicos e humanos, firmou a paisagem como categoria de síntese por excelência. Em termos atuais, pode-se dizer que a paisagem é o espaço vivido e produzido cuja imagem visual reflete as relações sociedade-natureza. Tal legado conceitual foi decisivo para que, com a vinda da Geomorfologia como campo específico no final do século XIX, a paisagem passasse a ser reinterpretada sob novas abordagens científicas.

1.4. A PAISAGEM SOB OLHAR GEOMORFOLÓGICO ATUAL

Com o advento da Geomorfologia, pensada, em seus primórdios, como um ramo da Geografia Física fortemente articulado à tradição geológica, o conceito de paisagem passa a experimentar novos deslocamentos e aprofundamentos. No limiar do século XIX para o XX, a figura de Davis (1899) adquire especial relevância nesse processo: ao desenvolver o modelo do chamado ciclo geográfico, Davis não apenas introduz, mas confere centralidade à dimensão temporal na compreensão das paisagens naturais, sugerindo que as formas do relevo evoluíam, sob a atuação dos agentes erosivos, por diferentes fases (juventude, maturidade, senilidade), até que a superfície terrestre, submetida à ação prolongada desses processos, atingisse o estado de peneplano, ou seja, uma topografia quase nivelada (Abreu, 1983; Monteiro, 2001; Inkpen e

Collier, 2007; Espindola, 2010; Fernandes *et al.*, 2023). Importa salientar, todavia, que, não obstante as críticas subsequentes ao determinismo e ao caráter excessivamente esquemático do modelo davisiano, o que se nota, a partir desse momento, é uma inflexão relevante: a paisagem, no âmbito da Geomorfologia, deixa de ser apreendida como mera fotografia estática e passa a ser problematizada como realidade fundamentalmente dinâmica, submetida ao jogo incessante de forças endógenas (tectonismo, por exemplo) e exógenas (como erosão e clima), tudo isso em escala de tempo geológico (Palka, 1995; Klein, 2012; Barros, 2013; Fernandes, *et al.*, 2023). A abordagem evolutiva proposta por Davis, ainda que carregue as limitações do seu contexto de produção, tensiona e expande o olhar até então predominante, centrado principalmente em recortes sincrônicos, ao evidenciar que as formas da paisagem constituem expressão material de processos históricos e de mudanças contínuas.

Em paralelo ao modelo davisiano, diversas escolas geomorfológicas desenvolveram-se ao longo do século XX, colocando inflexões e críticas que contribuíram para o amadurecimento do campo. Walther Penck (1953), por exemplo, propôs uma interpretação alternativa para a evolução do relevo, recusando a linearidade do ciclo de Davis e realçando ritmos diferenciados de soerguimento e erosão, perspectiva que, mais tarde, encontra desdobramentos nos trabalhos de L. C. King (1953). Ainda no final do século XIX, Gilbert (1877, 1890) já lançava as bases de uma abordagem pautada na ideia de equilíbrio entre as forças erosivas e a resistência do substrato, inserindo o conceito de ajuste (e, de modo incipiente, de *feedback*) nos sistemas que conformam a paisagem (Marques Neto, 2009; Fierz, 2016). Esse contexto de efervescência teórica vai desembocar, especialmente nas décadas de 1950 e 1960, na chamada Revolução Quantitativa, caracterizada pela inclusão da Geomorfologia climática e da vertente quantitativa. Autores como Arthur Strahler (1952) e Richard Chorley (1962) operam uma reconfiguração do olhar geomorfológico ao aplicar princípios dos sistemas físicos ao estudo das formas do relevo: a paisagem passa a ser pensada como sistema dinâmico, em que entradas (precipitação, energia) e saídas (sedimentos, escoamento superficial) se relacionam por meio de processos regulados por mecanismos de retroalimentação. O estudo geomorfológico, nessa circunstância, aproxima-se dos referenciais da teoria de sistemas e da cibernética, com destaque na quantificação dos processos (a título de exemplo, taxas de erosão, fluxos de sedimentos) e na compreensão das condições que favorecem a estabilidade ou, ao contrário, a instabilidade das formas do relevo (Troppmair, 2001; Ribeiro, 2010; Corrêa, 2014).

Superada a etapa da Geomorfologia clássica, observa-se a proliferação de abordagens contemporâneas acerca do conceito de paisagem, cuja importância transborda o âmbito restrito

da Geomorfologia, alcançando discussões mais amplas no interior da análise ambiental. Dentre tais vertentes, cabe ressaltar o ressurgimento, a partir dos anos 1970, das leituras humanistas e culturais da paisagem. Ainda que se situe num campo relativamente autônomo em relação às inovações estritamente físicas, a menção a tal abordagem revela-se fundamental para que se apreenda a polissemia que o termo paisagem adquiriu ao longo das últimas décadas. Geógrafos como Yi-Fu Tuan, Anne Buttimer, Denis Cosgrove e Peirce Lewis mudaram o foco, entendendo a paisagem não só como um dado empírico, mas como construção simbólica, um verdadeiro texto carregado de valores, memórias coletivas e representações sociais diversas (Nabozny, 2011; Barros, 2018; Martins, 2020). Cosgrove (1985), destaca a paisagem enquanto expressão cultural, vinculada a visões de mundo e atravessada por relações de poder (por vezes de matriz colonialista) que se projetam sobre o espaço na forma de imagens e ordenamentos. Tal aspecto faz emergir distinções, como a que contrapõe paisagens dominantes a paisagens residuais, sempre em função dos grupos culturais que as produzem. No âmbito da Geografia Humanista, nota-se a valorização da experiência subjetiva: a paisagem passa a ser interpretada segundo a ótica da percepção, dos sentidos e dos significados atribuídos, de modo que ela se mostra como processo sócio-histórico em constante construção e reconstrução, e não mais como simples fotografia estática da realidade material.

Convém notar que, ao reaver o conceito de paisagem do relativo ostracismo a que fora relegado durante o apogeu das abordagens quantitativas, as correntes humanistas e culturais promovem não apenas uma revalorização do termo, mas também um alargamento considerável de seu escopo. Nesse novo contexto, a paisagem deixa de ser mero pano de fundo das análises para ocupar posição de destaque tanto na Geografia quanto nas ciências sociais e ambientais. É nesse ambiente intelectual que ganha ressonância a proposta de Augustin Berque, ao introduzir distinções como paisagem-marca, entendida enquanto resultado material das mudanças feitas pela sociedade sobre a natureza, e paisagem-matriz, isto é, o contexto que torna possível a própria vida coletiva (Marandola e Oliveira, 2018; Morais *et al.*, 2025). Tal ampliação conceitual não deixa de chamar atenção para uma dualidade fundamental: se, por um lado, a paisagem reflete, de maneira singular, as marcas de uma sociedade, por outro, não se pode perder de vista que ela também interfere, em certa medida, na configuração dos modos de vida e nas práticas sociais. Logo, o discurso cultural atual sustenta que paisagem traduz o homem, mas ao mesmo tempo faz o homem, acentuando, assim, o caráter dialógico e processual do conceito (Maria, 2010; Andreotti, 2012; Furlanetto e Kozel, 2014; Soeiro, 2015; Baldin, 2021).

Vale lembrar, contudo, que mesmo entre aquelas abordagens voltadas para a dimensão qualitativa, mantém-se a noção de paisagem enquanto síntese, isto é, produto da interpenetração entre natureza e cultura. Essa compreensão, aliás, ainda ressoa no âmbito da Geografia Física atual, que, apesar de sua atenção predominante nos processos naturais, não pode prescindir da consideração da existência humana. Parafraseando Christofolletti (1999), a intensificação da interação das atividades humanas com os meios naturais faz do elemento social componente indissociável da paisagem, implicando alterações profundas inclusive nos resultados de ordem geomorfológica. Nesse sentido, a afirmação de uma perspectiva integrada (que reúne dimensões biofísicas e humanas) talvez se apresente como um dos aspectos mais notáveis da trajetória conceitual da paisagem ao final do século XX.

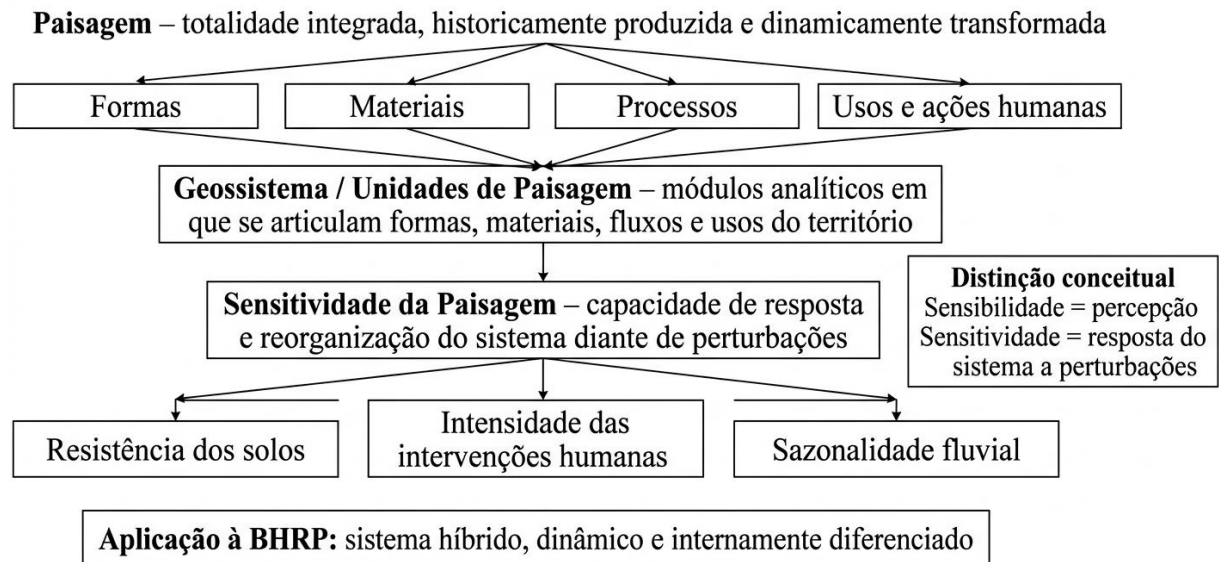
1.5. GEOSSISTEMA, UNIDADES E ANÁLISE INTEGRADA

Entre as contribuições mais significativas do período posterior à década de 1970, particularmente no âmbito da Geografia Física e da Geomorfologia ambiental, destaca-se a formulação do conceito de geossistema, bem como a delimitação de unidades de paisagem. Sob influência de correntes teóricas oriundas tanto da tradição soviética, a exemplo dos trabalhos de Sotchava (1962; 1963; 1977; 1978), quanto da vertente francesa representada por Bertrand (1968), observa-se um esforço deliberado de integração entre Ecologia e Geografia. A partir desse movimento, a paisagem passa a ser vista como sistema integrado, no qual se articulam elementos físicos, biológicos e humanos, evidenciando a busca por uma abordagem totalizante e interdisciplinar no estudo dos fenômenos espaciais (Neves *et al.*, 2014; Diniz *et al.*, 2020).

No instante em que Bertrand (1968) e seus colaboradores se debruçam sobre o conceito de Geossistema, o que se observa, de saída, é a tentativa de ultrapassar aquela velha separação entre processos naturais e dinâmicas sociais. Na prática, propor o Geossistema como unidade funcional da paisagem tem o significado de, antes de tudo, admitir que as fronteiras entre o que é considerado natural (seja o relevo, o clima, as águas ou as formações biogeográficas) e aquilo que se enquadra como social, econômico, cultural, são, na mais perfeita das hipóteses, limites porosos, mais úteis para fins analíticos do que como reflexo de uma realidade palpável. Não raro, aliás, a paisagem escapa dessas classificações, já que, ao longo do tempo, as marcas da presença humana acabam se imiscuindo de tal modo nos processos físicos que toda tentativa de dissociação resulta insuficiente, quando não ilusória (Mamigonian, 2003). A articulação entre

paisagem, geossistema, unidades de paisagem e sensibilidade, tal como mobilizada nesta tese, pode ser sintetizada (*Figura 1*).

Figura 1 - Síntese da abordagem conceitual adotada na tese



Fonte: Elaboração do autor (2025)

Nesse sentido, ao pensar o Geossistema, não se trata apenas de fazer um inventário dos elementos isolados ou de reunir categorias distintas em um mesmo quadro (Troppmair, 2001). O desafio é, principalmente, buscar compreender as múltiplas conexões (e aqui vale insistir: conexões de fato, não meramente postuladas), os fluxos, os circuitos de energia e de matéria que, em grande medida, sustentam a dinâmica e conferem identidade própria a cada recorte paisagístico. Ou seja, mais do que classificar ou quantificar, o estudo dos Geossistemas exige um olhar atento às relações, aos entrelaçamentos e às transformações que só se tornam visíveis quando se abandona a tentação de pensar em compartimentos estanques e se assume, de vez, o caráter integrado (e inevitavelmente complexo) do espaço geográfico.

No Brasil, essa leitura integrada não tardou a encontrar eco em nomes como Antônio Christofolletti (1979), Aziz Ab'Saber (1979), Jurandyr Ross (1992), entre outros; cada qual com suas contribuições singulares. Tome-se, por exemplo, Ross (1992), para quem as Unidades de Paisagem se individualizam a partir de fatores como relevo, clima, vegetação, solos, litologia; ou, não raro, pela combinação desses próprios elementos, em arranjos variáveis conforme o contexto analisado (Cavalcanti e Corrêa, 2016). Mas é preciso sublinhar que tais unidades não

apresentam limites rígidos: as transições entre paisagens, em geral, mostram-se gradativas, muitas vezes imperceptíveis ao olhar mais apressado; mesmo assim, há possibilidade de mapeamento, desde que se identifique certo grau de homogeneidade interna, sobretudo no que se refere aos principais componentes ambientais. Monteiro (2000), por sua vez, ressalta um ponto fundamental: a existência de uma unidade de paisagem depende, em grande medida, do funcionamento integrado dos seus elementos, seja no espaço, seja no tempo. Ou seja, não se trata, simplesmente, de listar fatores ou atributos, todavia de atentar para as formas como eles interatuam e, por meio desse entrelaçamento, aderem aquele conjunto paisagístico específico, único em suas dinâmicas e singularidades.

As *Unidades de Paisagem* acabam, de tal modo, consolidando-se como uma categoria de análise geográfica de grande utilidade, sobretudo no campo do planejamento ambiental e do ordenamento territorial. Tais unidades funcionam como módulos espaciais nos quais se observa certo grau de homogeneidade interna, tornando possível avaliar, de forma conjunta e integrada, a estrutura, o funcionamento e as dinâmicas do meio físico e dos usos humanos (Gomes e Vitte, 2018). Vale ressaltar que, nessa perspectiva, os termos “paisagem” e “geossistema” tendem a ser utilizados quase como equivalentes, pois ambos refletem a intenção de promover uma leitura integradora, tal como propõe o paradigma sistêmico. Não por acaso, Christofolletti (1998) chega a afirmar que a paisagem constitui um conceito-chave da Geografia, capaz de viabilizar a compreensão do espaço enquanto sistema ambiental, entendendo-se aqui as dimensões físicas e socioeconômicas, municiado de sua própria estrutura, funcionamento e dinâmica (Amorim e Oliveira, 2008; Seabra *et al.*, 2013). Do mesmo modo, Sousa *et al.*, (2024) reforça a ideia de paisagem como um todo sistêmico, no qual se entrelaçam natureza, economia, sociedade e cultura, sempre em meio a um contexto marcado por múltiplas variáveis.

É dessa orientação que se desdobra uma prática metodológica hoje bastante presente tanto na Geomorfologia quanto nos estudos de análise ambiental: a divisão do território em *Unidades de Paisagem* (Montezuma *et al.*, 2014). Vale destacar que essa compartimentação não se apoia em um critério único; pelo contrário, abarca a análise conjunta de diferentes elementos, como as formas do relevo, os tipos de solo, a cobertura vegetal, o padrão de drenagem, o clima e, via de regra, até mesmo o uso da terra, tudo isso visando delimitar regiões que apresentem certa coerência interna (Strücker, 2020). Uma vez identificadas, essas unidades não continuam no mesmo nível: podem ser hierarquizadas, agrupadas ou mesmo desdobradas em diferentes escalas de análise, como observa Moura-Fé (2019), o que permite adequar o olhar ao propósito do estudo ou da intervenção desejada. É preciso insistir que a cartografia dessas unidades não

representa apenas um avanço técnico: ela dá a possibilidade de visualizar, de forma concreta, a heterogeneidade ambiental e, a partir daí, orientar políticas de manejo e intervenção ajustadas às peculiaridades de cada caso. Não por acaso, pesquisas brasileiras vêm aplicando esse enfoque em bacias hidrográficas de diversas regiões, sobretudo quando o objetivo é planejar o uso do solo, conservar recursos naturais ou agir de modo preventivo na mitigação de riscos ambientais.

No caso particular da BHRP, referida nesta tese, a adoção do conceito de *Unidades de Paisagem* revela-se notadamente eficaz para a compreensão dos distintos segmentos ambientais presentes no interior da bacia. Cada unidade, que pode ser distinguida, por exemplo, por determinados tipos de relevo, como várzeas fluviais, terraços ou encostas mais elevadas; ou ainda por tipos de solo, sejam eles argilosos ou arenosos; além de diferentes formas de cobertura vegetal, variando de áreas de floresta densa a campos alagáveis e setores já desmatados, exhibe comportamentos geomorfológicos próprios. Noutro momento será analisada nesse trabalho como essa diferenciação se articula à questão da *Sensitividade da Paisagem*. O que se nota, de toda maneira, é que a noção de *Unidade de Paisagem* reflete uma fase bastante atual da Geografia Física, marcada pela ênfase na análise integrada e sistêmica. Nesse caso, a paisagem passa a ser imaginada, concomitantemente, enquanto forma e processo, produto e função, sempre englobando as dimensões da natureza e da sociedade no âmbito da escala regional.

1.6. SENSITIVIDADE E DINÂMICA GEOMORFOLÓGICA

A discussão sobre a *Sensitividade da Paisagem* abre espaço para uma reflexão acerca do relevo, com seus inúmeros processos, e das maneiras pelas quais ele se articula com forças externas e dinâmicas internas. Não se trata, é claro, de relações lineares, nem sempre passíveis de previsão ou controle, pelo contrário, há sempre uma dimensão de incerteza e multiplicidade de respostas possíveis. No entendimento de Brunsden e Thornes (1979), a *sensitividade* traduz justamente essa tendência de um sistema geomorfológico a reagir, de forma por vezes bastante expressiva, a oscilações ou situações de instabilidade. Vale lembrar que esse conceito, como tantos outros desenvolvidos no campo da Geografia, não se apresenta de imediato em sua versão mais acabada: ele percorre um trajeto, indo de análises centradas em descrições para abordagens mais sistêmicas, capazes de incluir, para além dos elementos físicos, os aspectos ligados à presença e à ação humanas. Assim, a paisagem perde aquele estatuto de mero pano de fundo e se

firma como um espaço de interação, onde natureza e sociedade se deparam, frequentemente em tramas marcadas por não linearidades e complexidades diversas.

É importante, nesse caso, estabelecer uma distinção entre o conceito de *Sensitividade da Paisagem* e a noção de “*sensibilidade*”, já que tal diferenciação contribui para tornar mais operativa a aplicação prática desses termos. A *sensitividade*, de um lado, refere-se ao quadro geral em que a paisagem apresenta capacidades de reorganização em presença de perturbações externas ou internas; já a *sensibilidade* incumbe-se, em muitos casos, o papel de instrumento metodológico, podendo ser utilizada de maneira qualitativa ou, em determinadas situações, quantitativa, para avaliar reações específicas do sistema. Não existe, vale ressaltar, um padrão único ou universalmente aceito para mensurar a *sensibilidade*: a comparação entre diferentes espaços geográficos, contudo, possibilita identificar variados graus de suscetibilidade, seja em relação a mudanças graduais ou abruptas. Em última análise, analisar a *sensitividade* de um algum recorte espacial implica traduzir, por meio de métricas ou descrições, a complexidade das interações estabelecidas entre fatores naturais e humanos.

A *sensitividade*, aqui, é entendida como a tendência de um sistema geomorfológico a reagir a oscilações ou situações de instabilidade e como o quadro geral em que a paisagem apresenta capacidades de reorganização frente a perturbações. A suscetibilidade, por sua vez, refere-se ao quão provável é a ocorrência de um fenômeno, sendo específica a um processo e definida independentemente dos fatores sociais (Girão *et al.*, 2018). Já a vulnerabilidade diz respeito à condição da sociedade frente às características do ambiente, refletindo variáveis socioeconômicas e a capacidade de resposta (Girão *et al.*, 2018), em outras palavras, uma noção intrinsecamente relacionada ao homem e à sua exposição (Lima e Amorim, 2023).

A densidade dos caminhos de fluxo e o grau de acoplamento entre os diferentes fatores do relevo constituem componentes fundamentais para a compreensão da complexidade inerente aos processos geomorfológicos. Brunsden e Thornes (1979) observam que, quanto maior a conectividade entre esses elementos, maior tende a ser a rapidez e a intensidade das respostas do sistema; por outro lado, áreas menos integradas podem preservar uma relativa estabilidade, mesmo diante de perturbações. Essa distinção dialoga com as observações de Wolman e Miller (1960), especialmente no que diz respeito ao papel desempenhado por eventos extremos (ainda que ocorram de modo esporádico), cuja força é capaz de alterar de maneira marcante o relevo de uma região. Em certos contextos ambientais, essas ocorrências se impõem como verdadeiras “viradas” no curso da teia geográfica, redesenhando, de forma abrupta, as feições da paisagem.

Brunsdon e Thornes (1979) introduzem um interessante recurso conceitual para discutir a forma como a *Sensitividade das Paisagens* surge, ao longo do tempo, frente as perturbações: é o chamado *Transient Form Ratio*, ou, em tradução livre, Razão das Formas Transitórias. Este índice está em conformidade com a relação entre o tempo médio necessário para que um sistema geomorfológico retome o equilíbrio após sofrer um estresse (o chamado tempo de relaxamento) e o intervalo médio entre eventos de estresse considerados significativos. O fruto dessa relação traz um indicativo do grau de transitoriedade ou de estabilidade que predomina em determinado ambiente. Ambientes cujos valores superam a unidade tendem a ser dominados por formas transitórias, sugerindo uma dinâmica de adaptação constante. Por outro lado, valores inferiores a 1 apontam para o predomínio de formas mais características e duradouras, típicas de situações em que o sistema se mantém em maior estado de estabilidade.

Mesmo que, à primeira vista, o relevo pareça estável, convém desconfiar dessa aparente tranquilidade. O que se revela, com um olhar mais cuidadoso, é uma alternância constante entre períodos de relativa estabilidade e fases de ruptura, uma dinâmica que está no cerne da própria paisagem. Gilbert (1877; 1880) havia apontado para essa sucessão de estados: momentos de equilíbrio, nos quais os processos tendem a se acomodar ao regime vigente, acabam sendo, cedo ou tarde, interrompidos por perturbações que, ao alcançarem certos limiares, reconfiguram inteiramente o sistema. Brunsden e Thornes (1979) revisitam essa ideia, reforçando que não se trata de uma linearidade, mas de uma sucessão de ajustes e desequilíbrios. E é interessante notar, a partir dos estudos de Schumm (1973) e Kirkby (1978), que nem sempre grandes mudanças são necessárias: em muitos casos, pequenas alterações (seja no fluxo das águas, seja na coesão dos materiais) já bastam para desencadear respostas rápidas, levando à formação de novos leitos fluviais ou ao surgimento de encostas instáveis. Isso indica que o relevo, longe de ser imóvel, está em constante mudança, mesmo quando tal movimento não se mostra prontamente visível.

O conceito de *Process Domains* (Processos Dominantes), nesse debate, surge como uma chave para identificar distintas combinações de fatores ambientais que acabam por dar origem a conjuntos recorrentes de formas no relevo (Brunsden e Thornes, 1979). Quando há certa constância (seja do clima, da litologia, ou mesmo das estruturas tectônicas), a tendência é que a paisagem permaneça relativamente consolidada, ao menos por algum tempo. Entretanto, basta que ocorram grandes eventos, ou ainda mudanças súbitas, para que toda essa dinâmica se altere de forma expressiva, como destacam Brunsden e Thornes (1979). Exemplificando, os autores mencionam a Pequena Era do Gelo, que evidencia o potencial que oscilações de temperatura e precipitação possuem para trazer mudanças geomorfológicas profundas; não raro, tempestades

ou episódios de chuva fora do padrão acabam funcionando como “gatilhos”, estabelecendo processos de transformação abrupta na paisagem.

Há ambientes que se mostram mais suscetíveis a mudanças, enquanto outros parecem continuar em um estado de relativo repouso, mantendo traços geológicos e climáticos herdados de tempos bastante remotos. Brunsden e Thornes (1979) notam que áreas marcadas por elevada interconexão tendem a oscilar com rapidez, respondendo prontamente a perturbações, ao passo que setores menos conectados mantêm padrões antigos por longos períodos. Não é sem razão que essa dualidade retoma as ideias de King (1960) e Twidale (1976), autores que identificaram superfícies continentais notavelmente pouco alteradas mesmo após milhões de anos. Do ponto de vista operacional, o resultado é a configuração de um verdadeiro “mosaico”, em que zonas de estabilidade convivem com outras marcadas pela instabilidade, revelando que a paisagem é, ao mesmo tempo, testemunho de transformações recentes e de heranças muito antigas.

Brunsdén e Thornes (1979) propõem a existência de dois polos de *sensitividade* no âmbito das paisagens. De um lado, identificam subsistemas móveis, altamente responsivos, que reagem prontamente a variações (sejam externas ou internas), promovendo ajustes rápidos a novos estados de equilíbrio. Esses subsistemas funcionam, por assim dizer, como “filtros energéticos”: absorvem boa parte das perturbações, porém, ao mesmo tempo, respondem a elas de maneira intensa, frequentemente promovendo mudanças perceptíveis. De outro lado, existe áreas caracterizadas pela estabilidade e por uma resposta bastante lenta. Nessas regiões, a concentração de energia, bem como de fluxos hídricos ou sedimentares, tende a ser reduzida, o que dificulta o rompimento de limiares críticos e, conseqüentemente, a ocorrência de mudanças substanciais. Tais locais, por conservarem formas do relevo oriundas de períodos pretéritos, acabam atuando como autênticos arquivos históricos da paisagem.

Interpretando a ideia de Brunsden e Thornes (1979), observa-se que certas regiões estão em constante processo de (re)ajuste, respondendo com frequência às mudanças que se impõem, enquanto outras guardam, em suas feições, marcas de antigos eventos climáticos ou tectônicos. Há lugares que conseguem se reorganizar em intervalos de tempo relativamente curtos, ao passo que, em outros, estruturas herdadas do passado permanecem quase inalteradas, principalmente quando processos recentes não conseguem ultrapassar determinados limiares de mudança. Os mecanismos de retroalimentação (positivos ou negativos) tendem, em muitos casos, a reforçar ou atenuar as respostas do sistema, enquanto a existência de “passivos” geológicos pode retardar ou até mesmo inibir alterações mais imediatas. Assim, é comum que o relevo atue como repositório de testemunhos de um passado por vezes desvinculado das dinâmicas atuais.

A verificação da imprevisibilidade e da não linearidade que permeiam os fenômenos geomorfológicos conduz a uma ampliação do olhar sobre o espaço geográfico, revelando a dialética que se situa entre momentos de estabilidade e processos de metamorfose. O estudo de Brunsden e Thornes (1979), longe de ser uma ruptura isolada, ecoa e retoma investigações anteriores, como as realizadas por Hack (1965), Schumm (1973), Wolman e Miller (1960) e Chorley (1962). Nele, não apenas se destaca a importância das modelagens e do Sensoriamento Remoto, mas também se enfatiza uma compreensão mais simbólica da paisagem, entendida como uma trama complexa que se desenrola entre heranças do passado e cenários projetados para o futuro. Essa concepção se consolida ao afirmar que a paisagem não é um mero suporte passivo, mas sim um espaço que expressa as interações recíprocas entre o meio físico e as subjetividades, valores e técnicas humanas que o atravessam.

Por fim, a Sensitividade da Paisagem não é um conceito rígido ou estático; antes, deve ser compreendida como um atributo em contínua (re)construção, que surge a cada ação humana ou mudança ambiental. Brunsden e Thornes (1979) destacam que a evolução geomorfológica é marcada pela alternância entre fases de estabilidade relativa e episódios de reformulação profunda, compondo uma narrativa que se desdobra em múltiplas escalas temporais. Para dar conta dessa trajetória, faz-se imprescindível mapear com atenção a densidade dos fluxos, as intensidades dos fenômenos, os limiares críticos que podem ser superados e as marcas deixadas por ambientes de origem distante. Sob esse olhar, entender a paisagem significa tanto identificar suas “cicatrices” quanto captar o potencial transformador que cada fenômeno encerra, numa dinâmica constante, onde a aparente solidez convive com a inevitabilidade da metamorfose.

1.7. SENSITIVIDADE DA PAISAGEM: ORIGEM

Ao analisar as referências reunidas em “*Landscape Sensitivity and Change (1979)*”, nota-se que Brunsden e Thornes já vinham, em trabalhos anteriores, explorando a capacidade dos sistemas geomorfológicos de se transformar e de absorver perturbações ambientais. Esses estudos, realizados antes mesmo da formulação sistematizada do conceito, representam um avanço teórico importante e, sem dúvida, foram decisivos para a consolidação posterior da noção de sensibilidade da paisagem. Entre as referências citadas no texto, chama atenção o fato de pelo menos dez pesquisas terem Brunsden e/ou John B. Thornes como autores ou coautores, o que revela a continuidade e o aprofundamento de uma mesma linha de estudo por anos.

Dos trabalhos citados, quatro se encontram disponíveis gratuitamente na internet até a data de publicação deste capítulo, sendo três deles artigos e o outro o livro *Geomorphology and Time*. Dentre essas publicações, destaca-se o livro, pois é justamente nele que Thornes aparece como coautor, em parceria com Brunsten (**Quadro 1**). Trata-se, aqui, de uma obra que inaugura uma colaboração inovadora entre os dois autores, antecedendo em dois anos a formulação definitiva do conceito que nos ocupa. O acesso a esse conjunto de textos revelou-se fundamental não apenas para uma análise mais minuciosa, mas também para a validação das evidências a respeito da trajetória intelectual de Brunsten e Thornes e para uma compreensão mais acurada do próprio processo de maturação conceitual da sensibilidade da paisagem.

Quadro 1 - Trabalhos em que Brunsten e Thornes figuram como autores ou coautores

AUTOR(ES)	ANO	TÍTULO DO TRABALHO
Brunsten, D. e Jones, D. K. C.	1972	<i>The morphology of degraded landslide slopes in south-west Dorset *</i>
Brunsten, D. e Kesel, R. H.	1973	<i>The evolution of a Mississippi river bluff in historic time *</i>
Brunsten, D. e Jones, D. K. C.	1976	<i>The evolution of landslide slopes in Dorset *</i>
Thornes, J. B.	1976 (a)	<i>Semi-arid erosional systems: case studies from Spain</i>
Thornes, J. B.	1976 (b)	<i>Discussion of paper by R. J. Chandler and others</i>
Thornes, J. B.	1977	<i>Hydraulic geometry and channel change</i>
Thornes e Brunsten	1977	<i>Geomorphology and Time *</i>
Brunsten, D. e Jones, D. K. C.	1979	<i>Relative time scales and formative events in coastal landslide systems</i>
Brunsten, D., Jones, D. K. C., Martin, R. P. e Doornkamp, J. C.	1979	<i>The geomorphological character of part of the low Himalaya of eastern Nepal</i>
Thornes, J. B.	1979	<i>Unstable behaviour in ephemeral channels and its wider implications</i>
*Disponíveis gratuitamente na internet		

Organização: o autor (2025)

Apesar de terem trilhado caminhos acadêmicos com algumas diferenças de abordagem (Brunsten empenhando-se à análise de encostas, deslizamentos e à evolução das vertentes, enquanto Thornes concentrava suas investigações na dinâmica geomorfológica, nos processos de erosão e nos sistemas fluviais), ambos contribuíram de modo significativo para elucidar a complexidade pertencente às formas terrestres. Suas pesquisas, cada qual com suas ênfases, expandiram a compreensão das paisagens, especialmente no que diz respeito à multiplicidade de temporalidades que marcam os processos geomorfológicos.

Para efeito de desenvolvimento da argumentação, opta-se por iniciar a análise pelos estudos mais recentes, para depois retomar aqueles de data anterior. Essa escolha metodológica,

ao inverter a ordem cronológica usual, visa justamente facilitar ao leitor a compreensão do percurso conceitual, permitindo que se observe primeiro a formulação já consolidada e, só então, se recupere o caminho trilhado até as bases iniciais do conceito.

1.7.1. Trabalhos-chave anteriores a 1979

No estudo realizado por Brunnsden e Kesel (1973), em Port Hudson, Louisiana (EUA), destaca-se a adoção de uma abordagem metodológica considerada inovadora para a época, baseada em uma análise histórica minuciosa das escarpas fluviais do Mississippi. Os autores recorreram tanto a mapas antigos quanto a fotografias aéreas e a medições de campo, a fim de avaliar as taxas de recuo dessas escarpas ao longo do tempo. Observou-se que a inclinação das encostas variava de 35° a 90°, com camadas de argila que favoreciam os processos erosivos. Um dos achados mais relevantes foi a identificação de tempos de resposta entre um e cinco anos após alterações ambientais, além de um padrão caracterizado por erosão intensa nos momentos iniciais, seguida de desaceleração. Esses resultados, posteriormente, se mostrariam fundamentais para a consolidação do conceito de sensibilidade da paisagem.

No trabalho de Brunnsden e Jones (1976), realizado em Dorset, no sul da Inglaterra, houve um aprofundamento de temas já explorados em pesquisas anteriores, especialmente aquelas desenvolvidas em 1972. Utilizando cartografia detalhada, análise de fotografias aéreas e levantamentos de campo, os autores conseguiram descrever com precisão os processos de escorregamento rotacional e a subsequente fragmentação dos blocos, fenômeno conhecido como “*block disruption*”. Chamou atenção, nesse contexto, o papel desempenhado pela erosão em pequena escala e pelo preenchimento das depressões formadas. Ao comparar áreas ativas com setores mais estáveis, o estudo evidenciou uma redução progressiva nas unidades de movimento de massa ao longo do tempo.

No estudo conduzido por Brunnsden e Jones (1972), em Stonebarrow Hill, Dorset, no Reino Unido, o foco recaiu sobre encostas com amplitude próxima de 150 metros e uma variação altimétrica que ia do topo, a 191 metros, até a linha costeira, a 148 metros. Os autores empregaram uma abordagem que aliava o uso de mapas antigos (alguns datando de 1887), cartografia contemporânea, fotografias aéreas do período de 1964 a 1969 e observações de campo sistemáticas. Identificaram, ao longo desse trabalho, quatorze deslizamentos ativos em diferentes posições topográficas, além de uma estratigrafia bastante diversificada, composta por siltes,

margas, areias, argilas, chert e sílex. Tais resultados foram fundamentais para esclarecer a propagação difusa dos movimentos geomorfológicos na área e, também, para reforçar o entendimento do chamado “tempo de relaxamento” nos processos analisados.

A análise desses estudos pioneiros destaca tanto a importância da difusão dos movimentos geomorfológicos quanto o papel central do chamado “tempo de relaxamento”, elementos que apontam para a possibilidade de as paisagens manifestarem respostas transitórias diante de eventos marcantes.

Primeiro, o trabalho de Brunsden e Jones (1972) introduz no debate as noções de *block disruption* e tempo de relaxamento, estabelecendo as bases conceituais iniciais. Posteriormente, Brunsden e Kesel (1973) acrescentam uma abordagem histórica e quantitativa, robustecendo a compreensão sobre respostas diferenciadas das paisagens frente a distintas perturbações. Por fim, o aprofundamento realizado por Brunsden e Jones (1976) apresenta análises comparativas entre áreas ativas e estáveis, expandindo e refinando os conceitos desenvolvidos anteriormente.

1.7.2. Geomorphology and time: preparação para 1979

Se avançarmos nessa trilha de reflexão, *Geomorphology and Time* (Thornes e Brunsden, 1977) surge como obra que tanto reúne quanto amplia argumentos desenvolvidos anteriormente pelos autores. O ponto de partida, ali, não é uma paisagem estática: o relevo aparece sempre em transformação, resultado da interação entre múltiplas forças (naturais e humanas), cujos efeitos raramente obedecem a trajetórias simples ou previsíveis.

É curioso notar como, para Thornes e Brunsden, o tempo deixa de ocupar um lugar passivo na análise geomorfológica. Ele interfere nos modos de resposta das paisagens diante de distúrbios ambientais, o que, aliás, se revela nas múltiplas escalas discutidas nos capítulos 2 e 3. Quando se dedicam sobre técnicas de datação ou métodos estatísticos (capítulo 4), o objetivo é investigar a persistência de formas e a variedade dos processos atuantes. Não carecem avisos quanto à estabilidade aparente (frequentemente ilusória, como apontado no capítulo 5) e à necessidade de considerar, nos capítulos 6 e 7, ideias como equilíbrio dinâmico, *feedback* e até mesmo modelagens matemáticas para interpretar as reconfigurações mais profundas do relevo.

Na reta final da obra, a discussão em torno da incerteza e da variabilidade (capítulo 8) remete à memória geomorfológica e ao conceito de equifinalidade, sugerindo que resultados

semelhantes, em termos de feições paisagísticas, podem resultar de caminhos bastante distintos. É nesse ir e vir, entre diferentes fatores e escalas, que os autores vão, de fato, ampliando as possibilidades de leitura das mudanças na paisagem.

Finalmente, Thornes e Brunnsden (1977) ressaltam, no capítulo 9, a ideia de que espaço e tempo não podem ser dissociados quando se busca modelar as formas do relevo. Tal ideia dialoga com a noção de uma Amazônia marcada pela multiplicidade e pela heterogeneidade de suas paisagens. Esse avanço conceitual, por sua vez, impõe a necessidade de um olhar mais abrangente e capaz de articular modelos empíricos com práticas aplicadas.

1.8. AVANÇOS CONCEITUAIS E METODOLÓGICOS

O legado transmitido por Brunnsden e Thornes (1979), já presente em seus trabalhos anteriores e sistematizado na obra *Geomorphology and Time*, vai além de meramente antecipar a noção de *Sensitividade da Paisagem*: ele prepara o terreno para que autores como Thomas e Allison (1993) possam ampliar, de forma expressiva, a aplicabilidade desse conceito. Ao reunir uma série de estudos empíricos e incorporar abordagens quantitativas no livro *Landscape Sensitivity* (1993), esses pesquisadores acabam por consolidar a ideia, ao mesmo tempo em que indicam caminhos concretos para sua mensuração e análise.

1.8.1. Da teoria à quantificação

Estabelecendo um paralelo entre as ideias de 1979 e as desenvolvidas em 1993, é possível notar, de imediato, uma continuidade no plano conceitual. Apesar disso, não se pode ignorar que também há, nesse intervalo, um salto metodológico bastante expressivo. Brunnsden e Thornes, à sua época, detinham-se sobretudo sobre as relações entre forças em jogo e as resistências oferecidas pelo meio. Já Thomas e Allison (1993) avançam no sentido de tornar a dinâmica dos limiares geomorfológicos mais acessível à mensuração, lançando mão de técnicas como modelagens hidrológicas, análises sedimentológicas e o uso de radionuclídeos (entre eles, o Césio-137), que servem ao rastreamento detalhado dos padrões de erosão. Vale notar que, se na década de 1970 a geomorfologia processual se firmava como uma ciência sistêmica, nos

anos 1990 ela passa a adotar decididamente uma orientação preditiva, orientando-se por novas demandas e possibilidades analíticas.

Nesse contexto, o *Transient Form Ratio* (conceito introduzido por Brunsden e Thornes (1979) como a razão entre o tempo de relaxamento de um sistema geomorfológico e o intervalo entre eventos perturbadores) passa a ganhar maior objetividade, sobretudo a partir do uso de medições, simulações e da comparação entre diferentes cenários. Assim, a paisagem, que por muito tempo permaneceu circunscrita ao debate teórico, começa a ser interpretada a partir de uma linguagem mais matemática, o que abre espaço para estimativas mais precisas sobre o grau de estabilidade ou de transitoriedade de determinado sistema.

1.8.2. Ação humana como modulador-chave

Se já em 1979 Brunsden e Thornes faziam menção à influência dos fatores humanos, é com Thomas e Allison (1993) que essa interação é vista de modo mais profundo, revelando que não é possível separar a ação humana dos processos físicos. Casos como a desertificação em Botswana, intensificada pela pressão da pecuária, ou ainda a urbanização de áreas ribeirinhas na Inglaterra, ilustram de que forma o uso do solo e as práticas de manejo podem tanto ativar quanto inibir respostas geomorfológicas, alterando, conseqüentemente, a sensibilidade dos sistemas estudados. Mesmo em regiões tropicais (como ocorre em amplas áreas da Amazônia), as lições acerca das mudanças no uso da terra encontram paralelos que não podem ser ignorados.

1.8.3. Categorias intermediárias e modelos computacionais

Em seu trabalho, Thomas e Allison (1993) não se limitam à tradicional oposição entre paisagens de alta sensibilidade e aquelas de resposta mais lenta. Eles introduzem categorias intermediárias, levando em conta elementos como a capacidade dos sistemas de amortecer perturbações, os diferentes graus de acoplamento entre processos e também a resistência oferecida pelos materiais que compõem a paisagem. Assim, o conceito de sensibilidade ganha um refinamento adicional, evitando simplificações que pouco contribuem para o entendimento da complexidade envolvida. Soma-se a isso o papel dos modelos computacionais, que, ao projetar cenários e testar hipóteses, acabam superando os limites das observações realizadas em campo.

Com isso, cresce não apenas a possibilidade de prever comportamentos futuros, mas também de planejar medidas para mitigar riscos, ampliando o escopo das análises geomorfológicas.

Desse modo, aquilo que, nos trabalhos de Brunsden e Thornes (1979), era basicamente qualitativo, assume, em Thomas e Allison (1993), uma qualidade cada vez mais quantitativa e orientada à previsão. A passagem de uma geomorfologia essencialmente descritiva para uma vertente preditiva acompanha, na verdade, os próprios avanços metodológicos e conceituais trazidos pelo estudo da *Sensitividade da Paisagem*. Se, de um lado, Brunsden e Thornes pavimentaram o caminho ao introduzirem princípios como o 'fator de segurança' e o '*Transient Form Ratio*', de outro, Thomas e Allison se encarregaram de projetar esses conceitos para um campo de aplicação mais robusto, o que inclui desde o mapeamento de áreas vulneráveis à erosão até o embasamento de políticas para a gestão de bacias hidrográficas. Não é complicado perceber que, em contextos como o amazônico, como na BHRP, tais metodologias podem ser replicadas, oferecendo subsídios para a previsão de regiões críticas quanto a desmatamento, erosão ou mesmo risco de inundação, reforçando, assim, o papel da ciência na governança territorial.

1.8.4. Paisagens encadeadas, sensibilidades interligadas

A edição especial da revista *Catena*, publicada em 2001, progrediu ainda mais nessa discussão ao explorar o conceito de *Sensitividade da Paisagem* sob múltiplos ângulos. Nesse contexto, a ideia de uma paisagem sensível adquire uma densidade metodológica ampliada e, sobretudo, interdisciplinar, articulando análises quantitativas e estabelecendo diálogos com campos como a ecologia, a climatologia e também as ciências sociais.

1.8.5. Refinando o conceito e explorando escalas

Brunsdén (2001), por sua vez, retoma a discussão sobre a Sensitividade da Paisagem, advertindo para o risco de banalização do conceito quando não se definem, de modo rigoroso, métricas que permitam aferir a resistência estrutural dos sistemas analisados. Já Thomas (2001) chama atenção para a importância de considerar os aspectos escalares: segundo o autor, a sensibilidade de uma paisagem só pode ser adequadamente compreendida quando se leva em conta

a resolução (tanto espacial quanto temporal) adotada na análise, já que diferentes escalas tendem a revelar manifestações distintas desse atributo.

1.8.6. Sistemas fluviais: laboratórios naturais

Uma parcela convincente dos estudos acaba por se acumular nos sistemas fluviais, tidos como espaços privilegiados para se investigar a relação entre processos geomorfológicos e impactos ambientais. Werritty e Leys (2001), a título de exemplo, revisitam questões ligadas à instabilidade dos canais fluviais na Escócia, enquanto Harvey (2001) dedica-se a discutir a conectividade entre encostas e canais. Burt (2001), por sua vez, defende a adoção do conceito de *Sensitividade da Paisagem* como meio para a gestão de bacias hidrográficas. A mensagem que se depreende desses trabalhos é clara: o relevo não pode ser tratado como elemento passivo; sua “capacidade ontológica” de amortecer ou amplificar mudanças está diretamente relacionada à existência de elos de feedback, variando conforme o grau e a intensidade das intervenções humanas. No contexto das bacias em ambientes amazônicos (principalmente naquelas sob forte pressão por desmatamento ou mineração), os sistemas fluviais propendem a se configurar em indicadores notadamente sensíveis de desequilíbrios, sendo também aqueles que, em geral, respondem de forma mais rápida às transformações impostas.

1.8.7. Ação humana e natureza em constante evolução

Simpson *et al.* (2001) trazem o exemplo do colapso dos solos na Islândia, evidenciando que o histórico de uso e manejo do solo pode deixar marcas silenciosas, cujos efeitos só vêm à tona gerações mais tarde. Grieve (2001), por outro lado, evidencia que alterações aparentemente discretas, como a compactação do solo ou episódios de poluição, podem ser suficientes para desencadear reconfigurações abruptas nos sistemas paisagísticos. Gordon *et al.* (2001) ampliam a discussão ao relacionar as mudanças de sensibilidade com aspectos de biodiversidade e diferentes padrões de uso da terra. O que se percebe, inclusive em regiões tropicais como a Amazônia, é que situações análogas tendem a ocorrer sempre que a ação humana prolongada modula os processos naturais, muitas vezes de maneira silenciosa, até que algum limiar crítico venha a ser superado.

1.8.8. Outros ambientes: zonas costeiras, turfeiras, vegetação

Nas regiões costeiras, Pethick (2001) e Hansom (2001) exploram os efeitos da elevação do nível do mar, chamando atenção para a existência de 'equilíbrios delicados' nos sistemas litorâneos analisados. Bragg e Tallis (2001), por sua vez, descrevem as turfeiras do Reino Unido como organismos sensíveis, que respiram de acordo com as variações do lençol freático e respondem, em seu próprio ritmo, às mudanças climáticas. Já Milne e Hartley (2001) conectam a deposição atmosférica de nitrogênio e o pastejo ao aumento da vulnerabilidade ecológica, enquanto Miles *et al.* (2001) enfatizam que a sensibilidade da paisagem abrange não só as formas, mas também os processos bióticos. No caso da bacia do Puraquequara, é certo que não se encontra turfeiras como aquelas descritas no Reino Unido, porém há áreas de várzea, igapós e campinaranas que desempenham papel semelhante, sobretudo no que se refere ao equilíbrio hidrológico e à sensibilidade diante de variações ambientais.

1.9. APLICAÇÃO DA SENSITIVIDADE DA PAISAGEM NO BRASIL

Não é difícil perceber por que a produção mais consistente sobre sensibilidade da paisagem, no Brasil, veio a se concentrar no Nordeste, especialmente em Pernambuco, na Paraíba e em outros recortes do semiárido. Longe de ser mero detalhe da distribuição regional da pesquisa, essa concentração parece refletir uma combinação bastante concreta entre a presença de grupos acadêmicos que passaram a trabalhar o tema de forma sistemática e a gravidade de problemas ambientais cuja recorrência impõe, por assim dizer, a urgência da análise: desertificação, erosão acelerada e formas diversas de instabilidade associadas a secas prolongadas e a eventos chuvosos intensos.

A partir dos anos 2000, trabalhos como os de Corrêa (2006), Vital (2011), Souza (2014) e Almeida *et al.* (2018) ajudaram a firmar, no país, uma base metodológica para a análise da sensibilidade da paisagem em bacias hidrográficas. Em linhas gerais, esses estudos convergem no uso articulado de sensoriamento remoto, observações de campo e cartografia temática em ambiente SIG. O que interessa, porém, não é apenas a repetição de um procedimento técnico, mas o modo como a sensibilidade deixa de funcionar como rótulo descritivo e passa a operar como chave de leitura da relação entre relevo, solos, formas de encosta, condições hidroclimáticas e uso da terra. É esse movimento que permite reconhecer quais unidades da paisagem

operam mais próximas de limiares de resposta e quais, ao contrário, revelam maior capacidade de absorver perturbações.

Fora do Nordeste, a aplicação do conceito segue menos frequente, embora não faltem exemplos importantes. Villas Boas e Marçal (2013), ao analisarem o alto-médio vale do rio Macaé, no Rio de Janeiro, deslocam a discussão para o contexto de uma bacia tropical úmida, em que os fatores de controle não se distribuem do mesmo modo que no semiárido. Seus resultados mostram que a sensibilidade do sistema fluvial esteve, naquele caso, mais ligada à variabilidade da pluviosidade do que às mudanças no uso e cobertura da terra. A lição teórica é simples, mas decisiva: paisagens distintas não respondem segundo uma fórmula única; respondem conforme a combinação específica de condicionantes que as estrutura.

Vista em conjunto, a literatura produzida no Brasil já demonstra a utilidade do conceito de sensibilidade da paisagem em pelo menos três direções: na identificação de áreas críticas em termos de degradação e risco, na compreensão dos fatores que condicionam a estabilidade ou a instabilidade das unidades de paisagem e no apoio ao planejamento ambiental e territorial. Na Amazônia, contudo, esse repertório ainda permanece pouco explorado. E é justamente aí que a presente tese encontra seu ponto de inserção: ao tomar a BHRP como recorte empírico, busca discutir a sensibilidade da paisagem em um contexto no qual sazonalidade hidrológica, diversidade morfoestrutural e urbanização acelerada se entrelaçam de maneira particularmente expressiva.

1.10. ESTUDOS SOBRE A BACIA DO RIO PURAQUEQUARA

Quando se observa o mapeamento físico feito por Costa *et al.* (2013), chama atenção, desde o início, o fato de as bacias do Puraquequara e do Tarumã-Açu aparecerem classificadas como grandes, tanto pelo porte quanto pela área abrangida. Mas não é só isso: essas bacias, curiosamente, não apresentam o padrão de dissecação acentuada que se costuma ver em outras regiões, predominando aí relevos de baixa declividade, quase sempre planos ou suavemente ondulados (Costa *et al.*, 2013). Esse conjunto de características geomorfológicas, que à primeira vista pode parecer um mero detalhe, acaba exercendo influência decisiva na dinâmica das cheias e no modo como a água escoar pela paisagem.

De fato, não se trata de áreas sujeitas às aquelas enchentes bruscas que marcam bacias menores e inclinadas. O escoamento, nessas condições, tende a ser lento, o que favorece, por

um lado, a infiltração da água e, por outro, faz com que os picos de cheia sejam bem mais contidos. Áreas de várzea e fragmentos florestais, ainda extensos, desempenham ali papel basilar: funcionam, em grande medida, como zonas de amortecimento, absorvendo volumes significativos e dissipando a energia dos fluxos, em vez de canalizá-los rapidamente.

Porém, se esse quadro relativamente estável foi predominante até tempos recentes, cabe mencionar que, sobretudo no setor oeste da bacia, justamente a fração mais próxima do núcleo urbano de Manaus, a pressão da expansão urbana tornou-se, nos últimos anos, um fenômeno inevitável. O que antes era um regime hidrológico amortecido, apoiado por condições naturais, agora se vê tensionado por novos desafios: impermeabilização dos solos, retirada da vegetação, alterações do microclima local, entre outros. Em suma, a antiga resiliência da bacia se torna, nessa nova circunstância, um atributo cada vez mais ameaçado, impondo desafios complexos para a gestão ambiental e o controle de riscos, tanto presentes quanto futuros.

É importante notar que, nos últimos anos, um número crescente de estudos científicos voltou-se para a bacia do Puraquequara, cada qual buscando iluminar facetas distintas desse ambiente. Encontram-se, nesse acervo, investigações que tratam desde a evolução do uso e da cobertura da terra, tema quase obrigatório diante das transformações em curso, passando por análises sobre riscos associados à ocupação irregular, até discussões mais voltadas à utilização dos próprios recursos hídricos. Não se trata, obviamente, de um corpo homogêneo de pesquisas, todavia de um conjunto plural, que reflete a multiplicidade de problemas (e de abordagens) presentes na região.

Na sequência, propõe-se realizar um apanhado crítico desses estudos, buscando discutir não apenas os principais resultados de cada um, mas, sobretudo, articulá-los à problemática maior da sensibilidade diferenciada entre as unidades de paisagem que compõem a bacia. Afinal de contas, é nessa interação, entre resultados empíricos e conceitos analíticos, que reside a possibilidade de compreender, em profundidade, os desafios e as potencialidades ambientais do Puraquequara.

1.10.1. Mudanças no uso e cobertura da terra (2005-2016)

Entre os trabalhos que se debruçam sobre a bacia do Puraquequara, chama atenção o estudo conduzido por Neves *et al.* (2020). O interesse desses autores esteve voltado à evolução do uso e cobertura da terra ao longo de três recortes temporais (2005, 2010 e 2016), valendo-se

de Sensoriamento Remoto e ferramentas de Geoprocessamento. O uso de imagens de satélite, permitiu classificar a paisagem em diferentes categorias, desde as principais formações vegetais até áreas de uso humano, com a quantificação das superfícies correspondentes para cada período analisado.

É interessante perceber que, ao final do recorte temporal, em 2016, predominava ainda a vegetação primária da Floresta Amazônica, ocupando cerca de 78,8% da bacia. Em princípio, esse percentual parece indicar uma situação de relativa estabilidade ecológica, ao menos no conjunto. Só que o quadro se revela um pouco mais matizado ao olhar as diferentes porções da bacia. Na parte leste, onde estão áreas sob domínio do Exército e unidades de conservação, a floresta se manteve praticamente intacta, não por acaso, já que a presença institucional e a existência de áreas protegidas funcionam, de fato, como obstáculo real à pressão humana.

O caso muda, entretanto, quando voltamos para a faixa oeste da bacia, aquela justamente mais próxima da periferia de Manaus (bairros Jorge Teixeira, Puraquequara e arredores). A diminuição da cobertura florestal aí se acentuou ao longo dos anos, com expansão de áreas classificadas como solo exposto, resultado do desmatamento, ocupação para fins agropecuários incipientes ou mesmo abandono após a remoção da vegetação original, além do surgimento de novas manchas urbanas. Os números de 2016 ilustram essa tendência: solo exposto já somava 11,23% da superfície da bacia, enquanto áreas urbanizadas chegavam a 1,23%. À primeira vista, valores que não saltam aos olhos; porém, a preocupação aumenta quando se percebe que esse crescimento ocorre, basicamente, às custas da substituição de vegetação secundária e capoeiras.

Os mapas produzidos deixam visível, sem maiores ambiguidades, que as frentes de desmatamento e de ocupação se abrem, sobretudo, ao longo das estradas que cortam a bacia e na periferia dos núcleos já estabelecidos. Em suma, apesar da aparência de conservação em larga escala, há, de fato, um processo de transformação silencioso e contínuo, muito marcado por pressões diferenciadas segundo a localização.

O que salta aos olhos, no trabalho de Neves *et al.* (2020), é, antes de tudo, o avanço quase silencioso, mas nem por isso menos grave, da ocupação sobre as áreas de preservação permanente. Não são apenas dados em mapas; trata-se das margens de igarapés, das nascentes, de faixas que, em teoria, deveriam estar protegidas por legislação específica, mas que, na prática, acabam sendo pressionadas por uma urbanização cada vez menos controlada e pelo desmatamento que não cessa.

Os autores não somente alertam, porém parecem insistir (e não sem motivo) que a fiscalização ambiental precisa ser muito mais do que mero procedimento protocolar. Cumprir a legislação, nesse contexto, é mais do que tarefa burocrática; é condição de possibilidade para que a mata ciliar siga existindo, mantendo a qualidade da água, evitando o desbarrancamento das margens, protegendo inclusive o próprio curso do rio contra a erosão acelerada.

A análise geral, ao fim, é dupla: de um lado, permanece ainda uma parcela considerável da bacia sob cobertura florestal, sobretudo no leste, onde a presença militar e as áreas protegidas funcionam como obstáculo a qualquer avanço mais brusco. De outro, na porção oeste, a situação se mostra francamente diferente: ali, a substituição das florestas primárias e secundárias por ocupações urbanas ou pequenas áreas agrícolas avança sem grandes barreiras, e não raro à revelia de qualquer planejamento formal.

O que tudo isso indica (e aqui não cabe antecipar conclusões) é que as pressões humanas dentro da mesma unidade hidrográfica são tudo menos uniformes. Os níveis de sensibilidade ambiental, como será discutido adiante, tendem a refletir essas diferenças, talvez de modo ainda mais acentuado do que as estatísticas, por si sós, seriam capazes de indicar.

1.10.2. Identificação das áreas de risco e ocupação desordenada

Quando se trata dos riscos geomorfológicos e, por extensão, dos riscos socioambientais na bacia do Puraquequara, vale mencionar o estudo de Lemos (2016). O interesse desse trabalho concentrou-se na porção oeste da bacia, não por acaso: é lá que se encontra o bairro Jorge Teixeira (com destaque para a comunidade João Paulo II), área de ocupação relativamente recente, marcada por precariedade, e, ao que tudo indica, detentora do maior número de desastres já registrados pela Defesa Civil Municipal, alagamentos e deslizamentos de terra, sobretudo.

A escolha desse recorte espacial não é mero detalhe metodológico; está diretamente relacionada ao fato de que, até a virada da década de 2010, a bacia do Puraquequara ainda era vista, em parte, como espaço rural ou, no máximo, periurbano. Contudo a expansão urbana de Manaus foi, nesse aspecto, implacável: a bacia acabou oficialmente reconhecida como área urbanizada, já integrada por vias de acesso e transporte público, articulando-se cada vez mais à malha da cidade.

O impacto desse processo é notório. A população cresceu de maneira acelerada e, na ausência de controle efetivo, a ocupação das margens e encostas, muitas vezes, em áreas impróprias sob qualquer perspectiva geotécnica ou ambiental, tornou-se rotina. O resultado, já então perceptível pelos registros oficiais, foi a multiplicação dos episódios de risco, em particular os alagamentos frequentes e os deslizamentos de terra que, de tempos em tempos, transformam a vulnerabilidade da paisagem em perdas concretas para a população local.

Na produção do estudo, Lemos (2016) optou por um trabalho de campo sistemático, cobrindo as comunidades assentadas tanto na planície de inundação quanto nas encostas da porção oeste da bacia. O método adotado misturou o uso de imagens de satélite (*Google Earth*) com verificações in loco, uma escolha pragmática, quase inevitável diante da extensão e da precariedade das áreas envolvidas. O objetivo era claro: identificar e mapear pontos marcados por eventos adversos já registrados, distinguindo, no produto final, as áreas atingidas por inundações com “manchas azuis” e os setores sujeitos a deslizamentos recentes com “manchas vermelhas”.

Chama atenção, porém, que esse mapeamento preliminar não estabeleceu uma gradação padronizada de intensidade dos riscos (por exemplo, R1, R2, R3, R4); ainda assim, propôs uma classificação qualitativa, entre risco baixo, médio, alto ou muito alto.

Tal abordagem, ainda que limitada em certos aspectos de precisão, serviu como ponto de partida para compreender, de maneira mais visual e pragmática, a distribuição espacial dos riscos mais imediatos à população da porção oeste da bacia.

O panorama apontado por Lemos (2016) é, no mínimo, inquietante, sobretudo quando se observa a situação da comunidade João Paulo II, inserida no bairro Jorge Teixeira. Ali, o adensamento de moradias precárias não ocorre apenas nos platôs ou nas encostas, mas também nas áreas baixas, adjacentes aos igarapés.

Esse retrato, que talvez seja mais comum do que se imagina nas periferias das grandes cidades brasileiras, sintetiza uma constelação de problemas típicos das ocupações irregulares em áreas sensíveis. Casas erguidas sobre palafitas, assentadas diretamente no leito dos igarapés, acabam obstruindo a calha, tornando-se vítimas recorrentes das cheias sazonais. O descarte de lixo nas margens e encostas (fruto, muitas vezes, da própria ineficiência da coleta formal) não apenas agrava o entupimento dos canais de drenagem, mas também contribui para instabilizar o terreno, tornando ainda mais frequentes e graves os episódios de deslizamento.

Some-se a isso a ausência de saneamento básico e de qualquer estrutura significativa para contenção de encostas, e o resultado não poderia ser outro: uma paisagem marcada por vulnerabilidade extrema. Curiosamente (ou, talvez, tragicamente), observa-se uma gradação social e espacial da precariedade: na parte mais alta da comunidade, sobre os platôs, a situação é um pouco melhor, com terrenos mais valorizados e casas de alvenaria; à medida que se desce pela vertente, o valor da terra diminui, as construções tornam-se mais rudimentares, até chegar ao fundo dos vales, onde moradias paupérrimas são comercializadas a valores irrisórios (segundo a autora, por vezes pouco mais que R\$ 1.000,00).

O componente socioeconômico do risco, logo, salta aos olhos: justamente as populações mais vulneráveis terminam por ocupar as áreas de maior perigo, fundos de vale inundáveis, encostas sujeitas a deslizamentos. Trata-se, infelizmente, de uma dinâmica que se repete em muitas cidades brasileiras, resultado de uma combinação perversa de desigualdade social, falta de política habitacional efetiva e tolerância institucional à ocupação de áreas impróprias.

Um ponto que não pode passar despercebido no estudo de Lemos (2016) diz respeito à localização das nascentes e cabeceiras do Puraquequara. Elas se deparam inteiramente inseridas na Reserva Florestal Adolpho Ducke, ocupando a porção norte da bacia, uma área de floresta primária protegida que, na prática, funciona como uma enorme APP, com níveis de integridade raros em áreas tão próximas a grandes centros urbanos.

O efeito imediato desse quadro é claro: a região das cabeceiras, permanecendo sob proteção, não apresenta ocupação humana significativa e, conseqüentemente, não registra eventos de risco. Trata-se de uma área geomorfologicamente estável (ao menos enquanto se mantiver livre de intervenções), cumprindo um papel fundamental ao garantir o fluxo regular e limpo de água para os trechos mais a jusante do rio.

Mas o problema, como quase sempre, aparece na transição, aquela zona intermediária, a franja onde termina a reserva e começa, de fato, a área urbana. É ali, justamente, que se concentram as tensões e onde o avanço da ocupação vem produzindo riscos concretos. Vale lembrar que, até aproximadamente 2010, boa parte do Puraquequara era vista como zona rural ou de chácaras de lazer, balneários inclusive; esse quadro, entretanto, foi drasticamente alterado pela expansão urbana registrada ao longo da década, que não só modificou o status oficial da região, mas trouxe consigo todo um conjunto de problemas, entre eles, a multiplicação das situações de risco já discutidas anteriormente.

É nesse exato contexto de transição, entre a área efetivamente protegida e a urbanização em expansão, que a questão proposta por Molinari (2023) ganha sentido: as áreas de risco “são” de risco, por uma suscetibilidade físico-natural intrínseca, ou “tornam-se” de risco à medida que a ocupação e a infraestrutura (ou a falta dela) reconfiguram fluxos, removem cobertura vegetal e ampliam a exposição e a vulnerabilidade? Em vez de uma resposta binária, o autor sugere que a gênese pode estar fortemente condicionada por características do meio físico, mas que o risco se consolida e se agrava como construção socioespacial, isto é, como resultado das imbricações entre uso do solo, desigualdades, ações e omissões do poder público.

O balanço final do trabalho de Lemos (2016) deixa poucas dúvidas quanto ao quadro que se desenha na bacia do Puraquequara: trata-se, claramente, de um território onde diferentes setores convivem com níveis bastante distintos de vulnerabilidade e risco. De um lado, a porção leste e norte, ali onde estão as nascentes, ainda protegidas pela Reserva Florestal Adolpho Ducke, mantém-se muito estável, sem registros de desastres e conservando as características de um ambiente ainda pouco tocado. Não se observa, nesses setores, ocorrência significativa de processos destrutivos, nem mesmo sob eventos de precipitação intensa, o que já diz muito sobre a resiliência da paisagem natural em condições de proteção efetiva.

O contraste, porém, é marcante quando o olhar se volta para a porção oeste, a faixa de periferia urbana, que, com o avanço da ocupação e do desmatamento, tornou-se um mosaico de instabilidades. Ali, os processos geomorfológicos destrutivos se multiplicam: erosão acelerada das margens, assoreamento, enchentes recorrentes em igarapés canalizados ou obstruídos, além de escorregamentos em encostas nuas de vegetação. A intensidade dessas ocorrências está longe de ser um acaso ou uma fatalidade natural; decorre, fundamentalmente, da intervenção humana: quanto mais forte a ação sobre o espaço (impermeabilização do solo, desmatamento, ocupação desordenada), maior a sensibilidade da paisagem a qualquer evento climático, de modo que uma simples chuva forte pode, rapidamente, se traduzir em danos concretos para quem ali vive.

Por outro lado, onde a paisagem permanece próxima de sua condição original (floresta preservada, solos pouco mexidos), observa-se uma resistência notável, com capacidade de absorver até mesmo as precipitações mais volumosas típicas do clima equatorial amazônico, sem manifestação de problemas graves. O diagnóstico, nesse sentido, é claro: a *Sensitividade da Paisagem*, longe de ser um atributo fixo, se apresenta como expressão direta do grau (e do tipo) de intervenção antrópica em cada recorte da bacia.

1.10.3. Características físicas e morfométricas da bacia

Para além das discussões sobre uso do solo e risco, não se pode deixar de lado a relevância dos estudos que se debruçaram sobre a caracterização física e morfométrica da bacia do Puraquequara. São esses trabalhos que, em última análise, fornecem a base para entender como os atributos geomorfológicos e hidrológicos mais elementares moldam o comportamento da bacia diante dos eventos climáticos.

Já foi mencionado aqui que Costa *et al.* (2013) destacaram dois pontos fundamentais: o baixo gradiente e a ampla área da bacia, fatores que, em conjunto, conduzem a uma resposta hidrológica lenta e a uma baixa propensão a picos de enchente. O mesmo estudo foi além do diagnóstico qualitativo, ao quantificar uma série de parâmetros morfométricos tanto para o Puraquequara quanto para o Tarumã-Açu, utilizando dados SRTM em ambiente de SIG, o que implica maior precisão nas análises. As relações de forma da bacia, a exemplo do fator de forma e do índice de circularidade, revelam que o Puraquequara ocupa uma posição intermediária: não é nem excessivamente alongado nem perfeitamente circular, condição que, aliada ao relevo suave, favorece uma distribuição temporal mais dilatada do escoamento. A declividade média, segundo os autores, é baixa; declividades extremas praticamente não existem, salvo exceções pontuais em barrancos junto aos igarapés. O quadro geral, portanto, é de uma bacia cuja resposta hidrológica é lenta, com cheias espaçadas e amortecidas, em consonância com o padrão esperado para áreas amazônicas de terras baixas. Não se trata de relevo montanhoso, sujeito a enxurradas abruptas, nem tampouco de vale encaixado, propenso a canalizar torrentes concentradas; pelo contrário, trata-se de uma paisagem dominada por planícies aluviais largas, onde o excesso de água dispõe de espaço para se redistribuir.

Entre os achados, chama atenção a densidade de drenagem relativamente baixa em ambas as bacias, um resultado coerente com a natureza pouco dissecada do relevo e compatível com maior infiltração e/ou menor geração de escoamento superficial, a depender das propriedades dos solos e da cobertura superficial. Em termos práticos, em condições naturais, o Puraquequara tenderia a transbordar com menor frequência, e seus picos de cheia tenderiam a ser menos intensos. O que se depreende dos achados morfométricos é relativamente direto: do ponto de vista físico-natural, a bacia do Puraquequara apresenta uma resistência intrínseca considerável diante de perturbações hidrológicas, mesmo em cenários de chuvas intensas.

Há ainda um conjunto de elementos físicos que merece atenção, em especial os tipos de solos e os atributos litológicos da bacia do Puraquequara. É fato que raros estudos se dedicaram a um detalhamento pedológico mais fino desse território, mas o que se conhece já permite algumas inferências. A bacia está inserida nas terras firmes da Amazônia, cenário em que predominam Latossolos argilosos avermelhados e Argissolos, ambos com alta proporção de argila de caulinita e óxidos de ferro. São solos, em geral, profundos, embora do ponto de vista químico apresentem baixa fertilidade. Há, ainda, os setores próximos aos cursos d'água: nesses trechos, aparecem Gleissolos, ou solos hidromórficos rasos, resultado direto da influência do lençol freático elevado e das inundações sazonais.

No que tange à litologia, Neves *et al.* (2020) aponta para a ocorrência de arenitos e conglomerados do embasamento sedimentar (Formação Alter do Chão), além de rochas mais recentes, de origem terciária ou cenozóica, quase sempre recobertas por espesso manto de intemperismo. Trata-se, portanto, de materiais sedimentares clásticos recobertos por alteração laterítica espessa, condição que torna a integridade da cobertura superficial e do manto de intemperismo um aspecto relevante para a estabilidade das vertentes.

Essas características têm implicações diretas sobre a sensibilidade da paisagem. Por exemplo, solos argilosos espessos podem apresentar boa capacidade de infiltração inicial; porém, uma vez saturados, podem contribuir para o surgimento de enxurradas e, se expostos, tornam-se vulneráveis à erosão laminar. O quadro se agrava nas encostas onde o solo já foi removido: ali, o que resta é um substrato pouco coeso (areia e cascalho do subsolo), material de fácil erosão. A resistência dos solos, portanto, não é um dado fixo, mas depende, em larga medida, de seu estado de conservação: intactos sob a floresta, exibem maior resistência superficial; expostos e revolvidos pela ocupação, perdem essa capacidade, tornando-se mais propensos à formação de ravinas e outros processos erosivos.

Ao menos nas áreas que ainda conservam cobertura florestal, a vegetação atua aumentando a infiltração e retardando o escoamento superficial. Em síntese, são características que, sob condições naturais, apontam para baixa sensibilidade da bacia às inundações.

Esse cenário, contudo, muda consideravelmente quando se observa o avanço de ocupações humanas inadequadas. Os estudos de risco já analisados são claros nesse ponto: a canalização ou o estreitamento dos igarapés, a supressão da mata ciliar e a impermeabilização progressiva dos solos urbanos podem subverter por inteiro o regime hidrológico-geomorfológico de uma bacia como o Puraquequara, elevando sua sensibilidade diante de distúrbios. Em outras palavras, distúrbios antes dissipados ou amortecidos passam a se concentrar, o equilíbrio lento

cede lugar a enxurradas pontuais, e uma paisagem até então estável pode passar a conviver com riscos antes menos prováveis.

Em síntese, tudo indica que o potencial natural de estabilidade do Puraquequara é elevado: trata-se de um sistema marcado por relevo suave, ampla cobertura florestal e uma dinâmica que, enquanto em equilíbrio, tende a responder de forma lenta e amortecida aos episódios de chuva. No entanto, esse potencial de estabilidade está longe de ser um atributo garantido em toda a extensão da bacia. As intervenções humanas (por vezes pontuais, por vezes sistemáticas) têm produzido rupturas locais, criando microáreas com comportamentos muito distintos dentro do mesmo território. Em outros termos, a aparente homogeneidade do sistema esconde uma multiplicidade de dinâmicas, condicionadas pelas mudanças em curso e pelo grau de distúrbio imposto sobre cada recorte da bacia.

1.10.4. Usos múltiplos da água e recursos hídricos

Chama atenção, ainda, um aspecto menos discutido, porém de notável relevância: os diferentes usos dos recursos hídricos na BHRP. Trata-se de uma questão também abordada no estudo de Neves et al. (2020), onde os autores procuram não apenas inventariar, mas também caracterizar a multiplicidade de formas pelas quais as águas do Puraquequara vêm sendo apropriadas tanto pela população local quanto por empresas. O interesse se estende, ainda, à maneira como esses usos se distribuem espacialmente ao longo da bacia, abrindo espaço para novas indagações sobre conflitos, sobreposições e impactos associados.

A metodologia seguida pelos autores foi reveladora: além do levantamento cartográfico e bibliográfico inicial, realizaram duas visitas técnicas de campo, estrategicamente distribuídas entre o período de cheia do rio e a fase de vazante, de modo a garantir a observação direta sob condições hidrológicas contrastantes. Esse cuidado, embora nem sempre comum em estudos aplicados, faz diferença.

Durante essas incursões, percorreram cerca de 7 km do trecho navegável do rio principal, começando da foz em direção às cabeceiras. Além disso, houve deslocamentos por terra, nos pontos considerados de maior interesse, com registro preciso das coordenadas geográficas e anotação sistemática das atividades observadas ao longo do percurso. O resultado, longe de ser apenas um inventário descritivo, buscou captar a diversidade e a distribuição real dos usos das águas na bacia, sob diferentes conjunturas.

O que chama a atenção, ao analisar os dados alcançados por Neves et al. (2020), é justamente a variedade de usos da água ao longo da bacia do Puraquequara e a forma como esses usos variam conforme o trecho considerado. Não se trata de um sistema homogêneo, onde uma única lógica predomina, mas de uma espécie de mosaico, no qual se combinam práticas tradicionais e atividades mais recentes, usos coletivos e intervenções de escala empresarial.

Começando pelo trecho de jusante, ou seja, mais próximo da foz, é ali que se concentram atividades como irrigação agrícola, com destaque para os assentamentos rurais instalados na planície aluvial. Hortas, pequenas lavouras... tudo isso depende de água captada diretamente do rio. Não é só: a extração mineral, sobretudo de areia depositada no leito, voltada à construção civil, também se faz presente. Observam-se, ainda, pequenos barramentos em afluentes, ao que tudo indica criados para reservatórios de irrigação ou piscicultura, além de escavações de tanques para criação de peixes. O efeito é um uso bastante intensivo da água, com modificações diretas nos cursos d'água e na dinâmica dos fluxos, o que pode ter consequências, muitas vezes não previstas, para a própria integridade do sistema.

Mudando o foco para os trechos de montante, nas partes altas e próximas às cabeceiras, o cenário já é outro: predominam as comunidades ribeirinhas tradicionais, morando em casas flutuantes, aquelas estruturas sobre balsas, muito vistas nos rios amazônicos. A água do rio, nessas localidades, é usada para consumo doméstico (quase sempre com algum tratamento improvisado) e para pesca de subsistência. Porém nem só de tradição vive o lugar. Os autores identificaram ali a presença de uma indústria frigorífica (abate e processamento de carnes) e de um estaleiro naval. Ou seja, mesmo na parte alta, longe da agricultura irrigada, existem fontes de pressão e risco, como lançamento potencial de efluentes orgânicos do frigorífico, resíduos industriais do estaleiro e uso intensivo de água para as operações.

E não se pode esquecer: para as comunidades ribeirinhas dessas áreas, a qualidade da água é questão vital. Toda contaminação impacta diretamente seu cotidiano, desde o preparo dos alimentos até a higiene básica. O que se nota é uma bacia marcada por pressões distintas, com vulnerabilidades e riscos distribuídos de modo desigual entre seus diversos setores.

Os autores, ao analisarem o conjunto de dados, observaram algo que parece evidente, mas que na prática revela-se complexo: os múltiplos usos da água no Puraquequara frequentemente competem entre si e, não raras vezes, interferem uns nos outros. Durante o período de seca, por exemplo, a captação intensiva para irrigação coincide com o rebaixamento natural do rio, intensificando a escassez e prejudicando tanto a navegação das comunidades de casas flutuantes quanto o abastecimento de outros usuários, afetando rotinas e economias locais.

O mesmo se dá com a extração de areia, uma atividade que, se mal manejada, aumenta a turbidez da água e favorece o assoreamento de alguns trechos do rio. O impacto? Piscicultura prejudicada, vida aquática comprometida, comunidades ribeirinhas tendo de conviver com a deterioração de sua principal fonte de subsistência. Some-se a isso o risco dos empreendimentos industriais: frigorífico e estaleiro, sem o devido tratamento de seus despejos, podem prejudicar gravemente a qualidade da água, afetando não apenas a pesca, mas também o uso doméstico pelas famílias da região.

Por outro lado, há um contraponto: a presença de áreas protegidas, como a APA e a Reserva Ducke, serve como uma espécie de válvula de equilíbrio, garantindo recarga de água limpa nas cabeceiras, o que, até certo ponto, ajuda a diluir impactos negativos oriundos de usos mais intensivos ou desordenados a jusante.

O estudo é enfático ao ressaltar um ponto fundamental: "a bacia exerce influência direta na sustentabilidade das atividades econômicas e de subsistência". Sem a água do Puraquequara, boa parte dessas práticas simplesmente não existiria. Daí a ênfase dos autores na necessidade de uma gestão integrada dos usos, sob pena de comprometer, de modo talvez irreversível, o desenvolvimento (e mesmo a permanência) das populações locais.

Quanto à sensibilidade da paisagem, os dados reunidos por Neves et al. (2020) deixam claro que a bacia do Puraquequara não é, de modo algum, homogênea. Há segmentos fortemente modificados, sobretudo na jusante, onde tanques escavados e pequenas barragens alteram o curso natural do rio, acentuando a retirada de recursos. Já nos setores de montante, predomina o uso tradicional, com trechos ainda relativamente intocados, sobretudo no interior da reserva: dois mundos que, embora vizinhos, convivem sob lógicas diferentes.

A sazonalidade fluvial, aliás, é um elemento-chave nessa dinâmica. Os autores chamam atenção para as mudanças drásticas entre o cenário de cheia, quando as várzeas ribeirinhas submergem e o acesso às moradias exige, em muitos casos, o uso de canoas, e o período de seca, quando bancos de areia afloram e as distâncias até a água aumentam consideravelmente. Esse vaivém não apenas modifica a paisagem física, mas afeta a viabilidade de certos usos: durante a seca, por exemplo, pesca e transporte ficam comprometidos em muitos igarapés; já nas cheias, plantações localizadas em áreas de menor altitude podem sofrer com inundações repentinas.

Existe, assim, uma adaptação histórica das comunidades a essa sazonalidade, um saber acumulado que, todavia, é constantemente desafiado (e às vezes agravado) pelas intervenções humanas. Um exemplo: bombas de irrigação precisam ser realocadas de acordo com o nível do

rio; tanques de piscicultura podem tanto transbordar durante a cheia quanto secar em parte na estiagem. São situações que exigem respostas práticas e rápidas, muitas vezes improvisadas, e que ilustram bem como a interação entre o regime natural do rio e a intensidade do uso humano define o grau de estabilidade (ou de criticidade) de cada setor da bacia.

1.10.5. Planejamento, conservação e conflitos de uso

Não se pode encerrar a análise sem ao menos mencionar os esforços de planejamento territorial e conservação que têm sido pensados e, em certa medida, implementados na área do Puraquequara. Essas iniciativas, ainda que dispersas e, muitas vezes, restritas ao âmbito local, vêm sendo documentadas em publicações técnico-científicas da região. Um caso que merece destaque é o e-book organizado por Rubim e Ferraz *et al.* (2021). Trata-se de um volume que compila capítulos diversos, abordando múltiplos aspectos socioambientais do Puraquequara.

O que salta aos olhos, na leitura desse material, é a ênfase no arranjo territorial complexo da bacia: longe de ser um espaço homogêneo, ela engloba setores urbanos, rurais e industriais do município de Manaus, formando (como o próprio título sugere) um mosaico de ocupações, usos e interesses que, em muitos casos, se sobrepõem ou mesmo entram em conflito direto.

Os textos reunidos no volume deixam claro um ponto incômodo: de acordo com o Plano Diretor de Manaus, a área da BHRP encontra-se, hoje, dividida entre diferentes categorias de uso. Uma parte é rotulada como zona urbana, o que, na prática, abre caminho para loteamentos e para a expansão regular (ou não tão regular assim) da cidade; outra porção aparece como zona de transição, categoria intermediária, marcada pela ambiguidade, típica de áreas periurbanas ainda em transformação, sem vocação plenamente definida.

Paralelamente, existe o reconhecimento formal, em legislações ambientais municipais, do Puraquequara como uma APA (Área de Proteção Ambiental), justificada por sua relevância ecológica e pelo papel estratégico no abastecimento hídrico. No entanto, e isso é reiterado nos capítulos do e-book, a implementação dessa APA está longe de ser plena. O que se nota é um descompasso considerável: de um lado, o ordenamento territorial aponta para a proteção via APA; de outro, o planejamento urbano, ao aceitar a urbanização de parte da bacia, praticamente legitima o avanço das ocupações.

O reflexo desse desencontro é nítido na BHRP: a APA, ainda que prevista, não foi regulamentada em tempo hábil para conter o avanço desordenado. O resultado, já antecipado nos capítulos anteriores, é uma configuração mista, uma fração do Puraquequara já densamente urbanizada, outra em pleno processo de transição (com sítios, chácaras, indústrias esparsas) e, finalmente, setores ainda preservados, sobretudo onde o acesso permanece difícil ou restrito por barreiras institucionais.

Diante desse cenário complexo, o e-book organizado por Rubim e Ferraz *et al.* (2021) não se limita à denúncia ou ao diagnóstico, mas avança para sugestões e relatos de experiências concretas de educação ambiental e mobilização social, visando valorizar a bacia em múltiplas frentes. O que pode se extrair do material de Rubim e Ferraz *et al.* (2021) é que, justamente em razão da sensibilidade e importância representativa da bacia do Puraquequara, seria pertinente não apenas reativar o seu Comitê de Bacia Hidrográfica, mas ainda elaborar um Plano de Bacia capaz de articular pesquisadores, poder público e moradores, proposta que, embora claramente óbvia, não tem sido trivial de implementar.

Entre as sugestões realçadas está a criação de novas Reservas Particulares do Patrimônio Natural (RPPNs) dentro dos limites da bacia, medida vista como estímulo para que proprietários particulares conservem, de modo ativo, fragmentos florestais e nascentes situados em terras privadas. A lógica é evidente: reconhecer, formalmente, que a bacia é ambientalmente sensível, principalmente nos setores próximos às nascentes e nos fragmentos de floresta remanescentes, classificados como de grande sensibilidade, o que sugere não apenas regulação, mas uma gestão atenta e, acima de tudo, participação comunitária na proteção dos mananciais.

A educação ambiental, nesse contexto, tem assumido papel central, seja em escolas, seja em comunidades, funcionando como estratégia para sensibilizar os próprios moradores acerca da relevância da bacia. A intenção é fomentar, gradualmente, um sentimento de pertencimento e, mais do que isso, promover a compreensão de que os usos múltiplos dos recursos hídricos precisam ser equilibrados, sob pena de comprometer a sustentabilidade da própria região.

Chama atenção, ainda, um dado recorrente nas pesquisas: até tempos relativamente recentes, o Puraquequara era reconhecido como a bacia mais preservada da cidade de Manaus (Rubim e Ferraz *et al.*, 2021). Esse fato não se explica apenas por indicadores técnicos ou estatísticas ambientais; ele revela algo mais profundo, uma resistência silenciosa da paisagem frente à lógica implacável da expansão urbana. Em grande medida, tal preservação encontra amparo nas áreas de proteção ambiental que a cercam: a Reserva Florestal Adolpho Ducke e a área de preservação do Centro de Instrução de Guerra na Selva (CIGS), que se erguem como guardiãs

da floresta, retardando o avanço da cidade e conservando a memória ecológica do território. Ao lado disso, a baixa densidade populacional contribui para que o Puraquequara permaneça, ainda hoje, como um raro refúgio, um espaço onde a natureza insiste em existir, mesmo quando tudo ao redor parece conspirar por sua substituição.

Nesse sentido, a bacia não pode ser vista apenas como um dado ambiental. Ela é símbolo de um embate mais amplo: entre permanência e transformação, entre aquilo que resiste e aquilo que se perde. O Puraquequara, assim, não é apenas uma paisagem, é uma metáfora viva da tensão entre a memória e o esquecimento, entre a persistência da vida e a avidez do progresso.

Contudo, e aqui reside o ponto de inflexão, esses mesmos trabalhos já alertavam para a fragilidade dessa condição. Com o avanço da mancha urbana, a expansão desordenada e a persistente carência de infraestrutura de saneamento, a situação vem se transformando de forma rápida. Em outros termos, o título de “bacia mais preservada” não está garantido: a continuidade dos processos de degradação pode, em breve, reverter o quadro, colocando em xeque justamente o que ainda resta de qualidade ambiental no Puraquequara.

O quadro da BHRP, do ponto de vista do planejamento e da conservação, pode ser definido como crítico, um verdadeiro ponto de inflexão. Por um lado, a importância ambiental da bacia é oficialmente reconhecida, não apenas em documentos, mas também no imaginário dos que acompanham o tema. Por outro, há uma pressão cada vez mais concreta (e crescente) exercida tanto pela urbanização quanto pelo desenvolvimento econômico local.

A encruzilhada está posta: as decisões tomadas neste momento, seja no sentido de, enfim, implementar a APA de forma efetiva, seja no controle rigoroso do uso do solo, na ampliação da infraestrutura de saneamento ou na participação real da população, irão, em larga medida, definir o futuro da bacia. Ou se preserva uma boa parte da resistência natural ainda existente, ou se inaugura um ciclo de sensibilidade crescente e degradação, com todas as consequências já amplamente discutidas ao longo dos estudos analisados.

1.11. RELAÇÃO ENTRE OS ESTUDOS E TESE PROPOSTA

A tese posta, de que as unidades de paisagem da bacia do Puraquequara apresentam diferentes níveis de sensibilidade, condicionados pela resistência dos solos, pela intensidade das intervenções humanas e pela sazonalidade fluvial, encontra, à luz da revisão bibliográfica,

respaldo consistente nos estudos mais recentes e relevantes sobre o tema. Não se trata aqui de uma afirmação solta, mas de uma constatação que emerge de múltiplas frentes de análise, cada qual lançando luz sobre um fragmento distinto da realidade.

Primeiro, quanto à diversidade de níveis de sensibilidade: os trabalhos revisados não deixam dúvida sobre a coexistência de paisagens extremamente distintas dentro de um mesmo recorte de bacia. Não é exagero dizer que o contraste entre as áreas de encosta florestada nas cabeceiras e as várzeas já urbanizadas na foz é quase paradigmático. Lemos (2016), por exemplo, revela que o oeste da bacia, hoje urbanizado, apresenta instabilidade pronunciada, enquanto a porção leste, ainda conservada, mantém relativa estabilidade. Neves *et al.* (2020) mostraram que a margem direita, com solo exposto e ocupação crescente, contrasta claramente com a esquerda, ainda dominada por floresta primária. Mesmo nos dados morfométricos de Costa *et al.* (2013), nota-se que a bacia abriga tanto trechos planos e de baixa declividade quanto encostas íngremes e pontualmente problemáticas. Cada setor reage, a seu modo, às chuvas e ao uso do solo, há, na mesma bacia, unidades altamente sensíveis e outras resilientes, lado a lado, exigindo leitura diferenciada e atenta às peculiaridades.

No que toca à resistência dos solos, a literatura converge: há uma relação direta entre o tipo de solo, sua cobertura e a propensão à instabilidade. Solos profundos e bem estruturados, como os Latossolos argilosos sob floresta (caso da Reserva Ducke), garantem alta resistência à erosão, praticamente não se observam processos destrutivos nesses segmentos. Já nas encostas ocupadas (Jorge Teixeira, por exemplo), a retirada da vegetação provoca rápida perda de coesão superficial, expondo alteritas arenosas e facilitando a formação de ravinas e voçorocas. Não é apenas uma questão teórica: relatos de encostas utilizadas como aterro de lixo, sem cobertura vegetal, ilustram o quanto o solo se torna vulnerável. Exemplos análogos em Recife (Almeida *et al.*, 2018) reforçam que a resistência não se altera de imediato com o desmatamento, mas o limiar de estabilidade é reduzido e o sistema fica sensível a eventos de chuva. Assim, o mosaico pedológico e de cobertura vegetal resulta em resistências muito diversas e, por consequência, em níveis igualmente variados de sensibilidade dentro da bacia.

O peso das intervenções humanas é igualmente incontornável. Onde a ação humana é intensa, seja pelo avanço de moradias, estradas, canalizações, extração mineral ou simples desmatamento, a sensibilidade cresce exponencialmente. O oeste do Puraquequara, urbanizado de modo informal, tornou-se palco de inundações e deslizamentos antes inexistentes. O corte de vegetação, a impermeabilização dos solos e a canalização dos igarapés aumentam o estresse local e reduzem a capacidade de resistência do sistema. Em contrapartida, áreas como a Reserva

Ducke, com mínima intervenção, permanecem praticamente insensíveis às perturbações regulares. Exemplos adicionais (tanques de piscicultura, barragens pontuais) revelam como mesmo intervenções localizadas podem gerar aumentos de sensibilidade hídrica e até riscos específicos (como rompimentos na cheia). O paralelo com outras regiões do país é inevitável: áreas intensamente manejadas correspondem quase sempre aos pontos de maior sensibilidade e degradação; setores preservados, à estabilidade.

A sazonalidade fluvial, característica marcante da Amazônia, atua como condicionante final desse sistema complexo. A alternância regular de cheias e vazantes, com o nível do rio subindo na cheia do Amazonas (dezembro-julho) e recuando na vazante (julho-novembro), reconfigura tanto o uso quanto a própria paisagem. Estudos de Neves *et al.* (2020) ilustram que áreas de várzea sofrem inundações durante a cheia (com efeitos negativos para agricultores, mas positivos para a recarga e a pesca). No entanto, a mesma sazonalidade pode ser benéfica ou destrutiva a depender do estado da unidade de paisagem: casas em planícies de inundação ficam altamente vulneráveis, enquanto florestas de igapó resistem sem danos. O impacto, logo, depende menos do regime fluvial em si e mais da adequação (ou inadequação) do uso do solo.

No fundo, o quadro que emerge é o de uma bacia marcada por uma multiplicidade de respostas, em que cada unidade de paisagem revela sensibilidade ou resiliência conforme a interação, sempre local, entre solo, cobertura, uso e ciclo hidrológico. Não se trata, portanto, de generalizar, entretanto de reconhecer e analisar, caso a caso, o que torna cada fragmento do Puraquequara mais ou menos sensível às perturbações, naturais ou antrópicas.

Em síntese, todos os fatores levantados na tese encontram eco (e, mais do que isso, confirmação empírica) nos estudos dedicados à BHRP. O cenário que se apresenta é, antes de tudo, o de um mosaico: paisagens com sensibilidades bastante distintas, cuja gênese repousa diretamente nas condições geológicas e pedológicas, no grau de ação humana e, não menos importante, no regime natural de cheias, que age como uma espécie de “teste de estresse” recorrente da estabilidade de cada porção da bacia.

É digno de nota, porém, que nenhum dos trabalhos revisados aplicou, ao pé da letra, as metodologias clássicas de mapeamento de sensibilidade da paisagem (nos moldes, por exemplo, de Souza 2015 ou Vital 2011) especificamente no Puraquequara. Ainda assim, as evidências, tanto qualitativas quanto quantitativas, são convergentes sobre a localização e as razões das áreas mais sensíveis ou mais estáveis.

Quando se observa o mapa da BHRP, percebe-se que as áreas de alta sensibilidade não estão distribuídas ao acaso: são as encostas ocupadas sem cobertura vegetal, marcadas pelo risco de deslizamentos; são as margens de igarapés degradadas ou sujeitas à ocupação, expostas à erosão lateral e às inundações; são, ainda, as baixadas utilizadas inadequadamente, como as várzeas habitadas ou cultivadas sem qualquer adaptação à cheia. Nessas zonas, o quadro é de permanente vulnerabilidade: solos expostos, intervenção humana intensa, o pulso sazonal do rio agindo, tudo isso se combina para produzir erosão rápida, inundações prejudiciais, assoreamento acelerado.

Na outra ponta do espectro, surgem as áreas de baixa sensibilidade: reservas protegidas, encostas ainda florestadas, planícies alagáveis que permanecem em condição natural. Ali, a resposta à perturbação é bem distinta. Mesmo diante de eventos excepcionais, como uma chuva fora do padrão, a paisagem tende a absorver o impacto e retornar ao seu estado anterior, sinalizando notável resiliência.

É claro que, entre esses extremos, existem zonas intermediárias. Áreas em regeneração, capoeiras, usos menos intensivos, ou mesmo tanques de piscicultura cuidadosamente implantados, podem ocupar uma faixa de sensibilidade moderada. Tudo vai depender da forma de manejo, do grau de adaptação e, sobretudo, do tempo. A escala temporal não pode ser negligenciada: há sensibilidades que se manifestam de imediato, após um único evento, e outras que vão se acumulando silenciosamente, ano a ano, até romperem o equilíbrio.

Os trabalhos analisados captam, provavelmente, o início de um processo mais amplo de degradação. Se nada for feito, se a tendência atual de exposição do solo, supressão de cobertura e manejo inadequado persistir, áreas que hoje mostram sensibilidade média podem, em questão de poucos anos, tornar-se francamente instáveis. O caminho contrário também é possível: iniciativas de recuperação (reflorestamento de APPs, saneamento básico, gestão participativa) tendem a reforçar a resistência e diminuir, no futuro, o risco de colapso.

No balanço final, a literatura revisada não só confirma a hipótese central da tese como a aprofunda: os diferentes níveis de sensibilidade da paisagem, na bacia do Puraquequara, são, efetivamente, função da resistência dos solos, do tipo e intensidade das intervenções humanas e do regime fluvial sazonal. Os desastres ocorrem onde há pressão antrópica e baixa resistência; a integridade se mantém onde a vegetação e o solo estão preservados; a cheia, longe de ser o problema em si, revela (de modo quase pedagógico) quais setores resistem e quais colapsam.

Isso tudo reforça a necessidade de um planejamento ambiental que saiba reconhecer as diferenças internas do próprio território: focar as ações nas áreas sensíveis, recuperar e proteger o que for possível, e, por outro lado, permitir usos mais intensivos onde a resiliência o comportar. Sem esse equilíbrio, o risco é perder não apenas os serviços ecossistêmicos da bacia, mas, no limite, a própria base material que sustenta seus múltiplos usos. Afinal, estudar sensibilidade da paisagem não é só exercício acadêmico é, sobretudo, tentar evitar que as áreas hoje estáveis venham a se degradar, e mitigar o que já foi danificado nas zonas mais críticas.

A abordagem teórica desenvolvida neste capítulo permitiu estabelecer os fundamentos conceituais que orientam a leitura da paisagem como expressão de processos dinâmicos e multiescalares. A partir dessa base, torna-se possível avançar para a análise dos aspectos físicos e socioespaciais da bacia do Puraquequara, cuja configuração da paisagem resulta da interação entre fatores naturais e ações humanas historicamente situadas. O próximo capítulo se dedica, assim, à caracterização desses componentes, com vistas a compreender as condições estruturais que conformam o espaço e influenciam sua sensibilidade paisagística.

CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E OCUPAÇÃO

Estudar a bacia do Puraquequara proporciona uma compreensão detalhada de suas características e da paisagem. Esse conhecimento facilita a identificação de padrões na paisagem e possibilita o desenvolvimento de modelos que podem ser adaptados e aplicados a outras regiões com características semelhantes.

Contribuição da doutoranda Gabriela Mendonça da Silva, em conversa nas dependências da UFAM, mar./2023.

2. CONDICIONANTES NATURAIS E HUMANOS

Na medicina, antes de qualquer diagnóstico ou tratamento, é fundamental compreender detalhadamente o estado atual e o histórico do paciente. De forma análoga, para estimar-se a sensibilidade da paisagem na BHRP, é necessário primeiro caracterizar suas condições físicas, ambientais e de uso do solo. Assim, neste capítulo, é apresentada uma anamnese detalhada dessa bacia, destacando as particularidades de suas margens, comparáveis às diferentes partes do corpo de um paciente que respondem de forma distinta a fatores externos e internos.

A margem esquerda do rio, predominantemente preservada e com vegetação primária, pode ser vista como um órgão vital em estado de repouso, cujos atributos naturais permanecem quase intocados. A baixa ocupação humana nessa área sugere uma resistência robusta, mas com uma sensibilidade latente a distúrbios severos, semelhante a um sistema imunológico que nunca foi testado contra infecções agressivas.

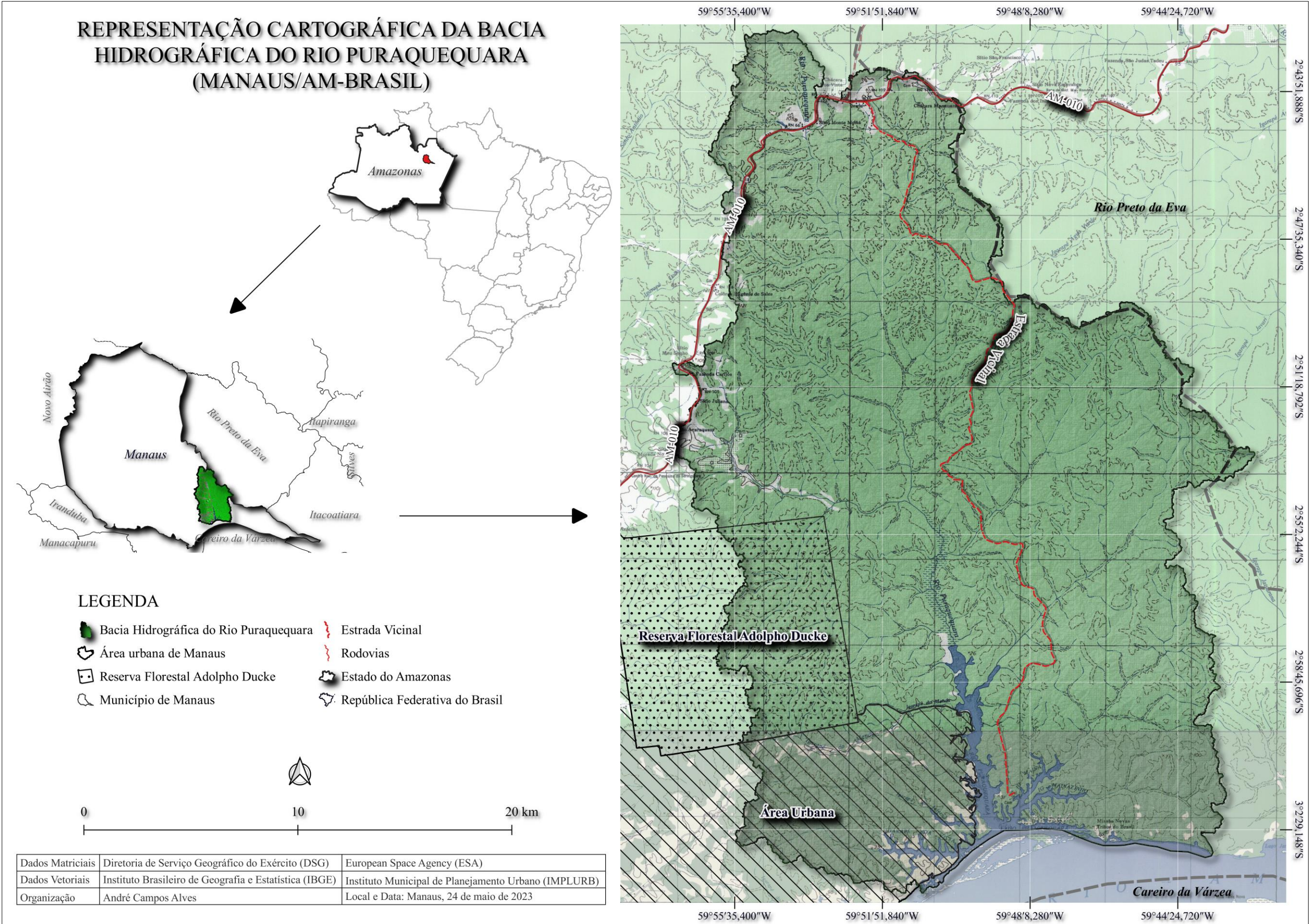
Em contraste, a margem direita, marcada pela intensa ocupação humana e diversos tipos de uso do solo, assemelha-se a um paciente que passou por múltiplas cirurgias e tratamentos. Mesmo diante dos impactos constantes, essa margem desenvolveu mecanismos de adaptação e resiliência, comparáveis a cicatrizes e adaptações fisiológicas que permitem ao corpo humano retornar ao equilíbrio após repetidos estresses.

A caracterização da BHRP é essencial para reconhecer as diferenças entre as margens do rio. Dessa maneira, são vistos aspectos como topografia, hidrologia, tipos de solo, cobertura vegetal e uso da terra, oferecendo uma base robusta para compreender como essas variáveis afetam a sensibilidade e a resiliência das paisagens em resposta a fatores desestabilizadores.

2.1. LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA E EXTENSÃO TERRITORIAL

A BHRP possui uma área de drenagem estimada em cerca de 694,8 km² (Costa *et al.*, 2013). Situada na parte oriental do município de Manaus, a bacia estende-se entre as latitudes 2°42'S e 3°05'S (**Figura 2**). Este recorte espacial abrange importantes elementos geográficos, como uma parcela da Reserva Florestal Adolpho Ducke (RFAD), além de incluir a área de proteção do Exército Brasileiro, vinculada ao Centro de Instrução de Guerra na Selva (CIGS).

Figura 2 - Mapa de localização da BHRP



Organização: o autor (2023)

Localizada entre área urbana e rural, a BHRP é classificada como periurbana. Embora essa seja uma questão paralela à discussão principal desta tese, é pertinente ressaltar que, sob o prisma da gestão de recursos hídricos, os limites da BHRP, com pequenas exceções ao nordeste, coincidem com a divisão político-administrativa do município de Manaus. Essa exceção refere-se ao Rio Preto da Eva, único município fronteiriço.

No Brasil, apesar do caso semelhante da Bacia do Tarumã, também em Manaus, é raro que uma bacia hidrográfica com área superior a 600 km² esteja inserida em um único município. Nesse contexto, essa configuração territorial favorece a análise dos resultados, especialmente no que tange ao uso e ocupação do solo, pois permite relacionar diretamente as características das unidades de paisagem ao Plano Diretor Urbano e Ambiental da cidade, em especial, Manaus (PDUAM). Isso simplifica a identificação dos graus de sensibilidade da paisagem, visto que as políticas de uso do solo e as diretrizes ambientais são, teoricamente, uniformes em toda a área da bacia, aspecto que será validado ou não no capítulo 4.

Ao reconhecer a centralidade do uso e ocupação do solo para a presente tese, impõe-se a necessidade de uma incursão específica sobre o processo histórico de apropriação da BHRP, tópico a ser explorado no devido momento. Se é certo que o exame da paisagem requer uma abordagem integrada, que contemple os múltiplos fios que a compõem, por razões de ordem didática e metodológica opta-se por uma sequência analítica que respeita a lógica estruturante da própria paisagem, em consenso com a proposta de Vieira (2008): geologia, geomorfologia, hidrografia, clima, pedologia e vegetação.

Tal ordenamento está longe de ser uma escolha arbitrária; antes, reflete o jogo de condicionamentos e dependências recíprocas entre os elementos da paisagem, onde cada componente, a exemplo de camadas em uma escultura geológica, influencia e limita os subsequentes. A geologia desponta como substrato fundamental, uma “plataforma silenciosa” sobre a qual a geomorfologia esculpe as formas do relevo; estas, por sua vez, direcionam os fluxos hídricos, regulam microclimas e, junto aos demais fatores, criam as condições para a gênese dos solos e o estabelecimento das comunidades vegetais.

É apenas após construir essa base compreensiva, assentada nos componentes físicos estruturantes, que se torna possível, e metodologicamente coerente, analisar os aspectos urbanos e as formas de uso e ocupação do solo, sempre atentos à sua intrínseca articulação com a matriz natural. A adoção desse caminho progressivo, longe de diluir a complexidade do território em partes isoladas, busca lançar as bases para a posterior identificação das unidades de paisagem, onde o natural e o humano se entrelaçam de modo indissociável, lembrando-nos de que a

paisagem é sempre, e de maneira inevitável, uma construção híbrida, em perpétua (re)configuração.

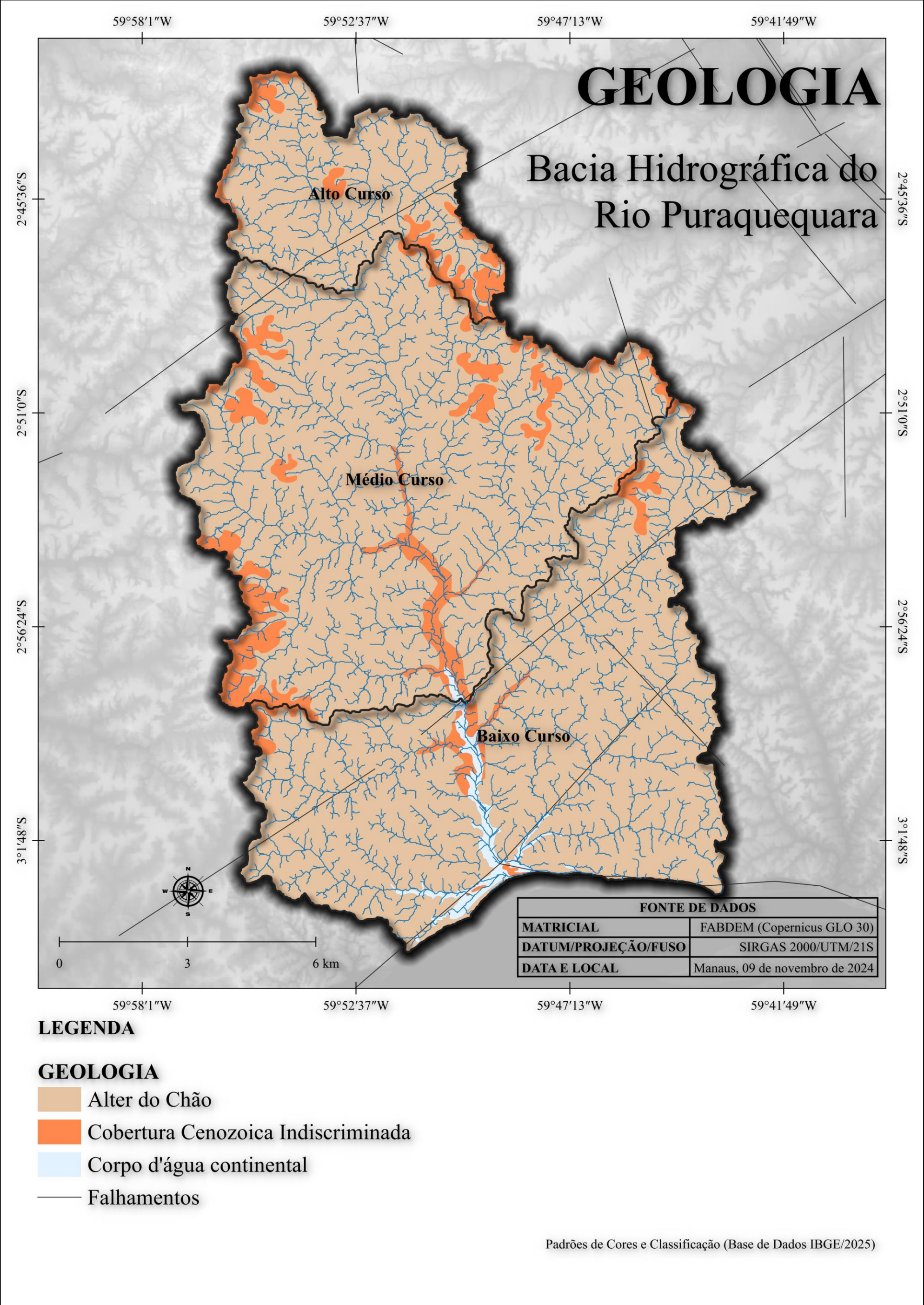
2.2. CONTEXTO GEOLÓGICO

Tomar a BHRP como ambiente implica reconhecer que seu arcabouço geológico não é mero pano de fundo, mas componente ativo da configuração territorial. De modo consequente, a inserção da bacia na sinéclise Paleozoica do Amazonas, de direção WSW–ENE e com espesso preenchimento sedimentar e ígneo, estabelece o suporte estrutural sobre o qual se organizaram, ao longo do Cenozoico, a sedimentação e a rede de drenagem que afeiçoam a paisagem atual (Nogueira *et al.*, 1999; Sarges, 2007; Sarges *et al.*, 2011).

No Cenozoico, um sistema fluvial de alta energia, voltado originalmente para o Pacífico, promoveu a deposição em leques e planícies aluviais e em deltas de clima tropical, com acúmulo expressivo de sedimentos arenosos que deram origem à Formação Alter do Chão (Reis *et al.*, 2006; ANA, 2015). Longe de ser apenas um registro estratigráfico, essa formação (**Figura 3**) opera como substrato ativo do relevo composta por rochas siliciclástica predominantemente avermelhada, de ambiente flúvio-lacustre, cuja composição inclui argilitos, folhelhos, siltitos, arenitos (ainda arcoseanos e quartzo-arenitos), quartzo-grauvacas, brechas intraformacionais e conglomerados, com colorações do esbranquiçado ao rosado, frequentemente caulinizadas e, por vezes, silicificadas (Horbe *et al.*, 2005; Costa e Silva, 2010; Santos *et al.*, 2010; Furtado *et al.*, 2016; Miranda, 2017; Neves *et al.*, 2020). Na estiagem, afloramentos ao longo do rio expõem arenitos com camadas silicificadas, evidenciando diagênese e exposição prolongada (ANA, 2015). As intercalações de argilitos, siltitos e conglomerados registram oscilações de energia de fluxo e estágios alternados de deposição e erosão, com formação de paleossolos e superfícies laterizadas vinculadas à divagação fluvial e à oxidação (Reis *et al.*, 2006).

Sobre esse embasamento imediato se dispõem depósitos aluvionares mais jovens (Quaternário), reunindo fácies de canal e de planície de inundação que testemunham processos sedimentares ainda atuantes na modelagem do relevo (Costa *et al.*, 2013; Neves *et al.*, 2020). A presença de perfis lateríticos, autóctones (completos) e alóctones, geralmente imaturos e truncados, compostos por caulinita, quartzo, goethita, hematita e, ocasionalmente, gipsita, indica pedogênese de longa duração sob condições tropicais úmidas (Mafra *et al.*, 2002; Horbe *et al.*, 2005; Costa *et al.*, 2013; Gonçalves e Miranda, 2014; Rocha, 2022)

Figura3 - Mapa geológico compilado do Serviço Geológico do Brasil (CPRM)



No plano neotectônico, o soerguimento andino conduziu à inversão da drenagem amazônica para o Atlântico, repercutindo no controle estrutural dos sedimentos da Formação Alter do Chão (Franzinelli e Igreja, 1990). Entre os rios Negro e Nhamundá, um feixe de lineamentos NW–SE e NE–SW condiciona o traçado de cursos como Puraquequara, Preto da Eva, Urubu, Uatumã e Aneba (Sternberg, 1950; Costa *et al.*, 1996; Silva, 2005; Carvalho e Tomasella, 2014). A BHRP expressa de modo claro esses controles estruturais: o canal principal acompanha falhas N–S, com foz afogada orientada E–W, enquanto afluentes (como o igarapé do Aleixo) tendem a NE–SW (Silva, 2005).

2.3. ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS

A BHRP apresenta relevo controlado por estrutura, neotectônica e erosão diferencial. O resultado é típico dos platôs da Formação Alter do Chão, sob forte condicionamento estrutural (Mafra *et al.*, 2002; Silva, 2005; Costa e Silva, 2010; Franzinelli e Igreja, 2013; Gonçalves e Miranda, 2014; Furtado *et al.*, 2016; Miranda, 2017).

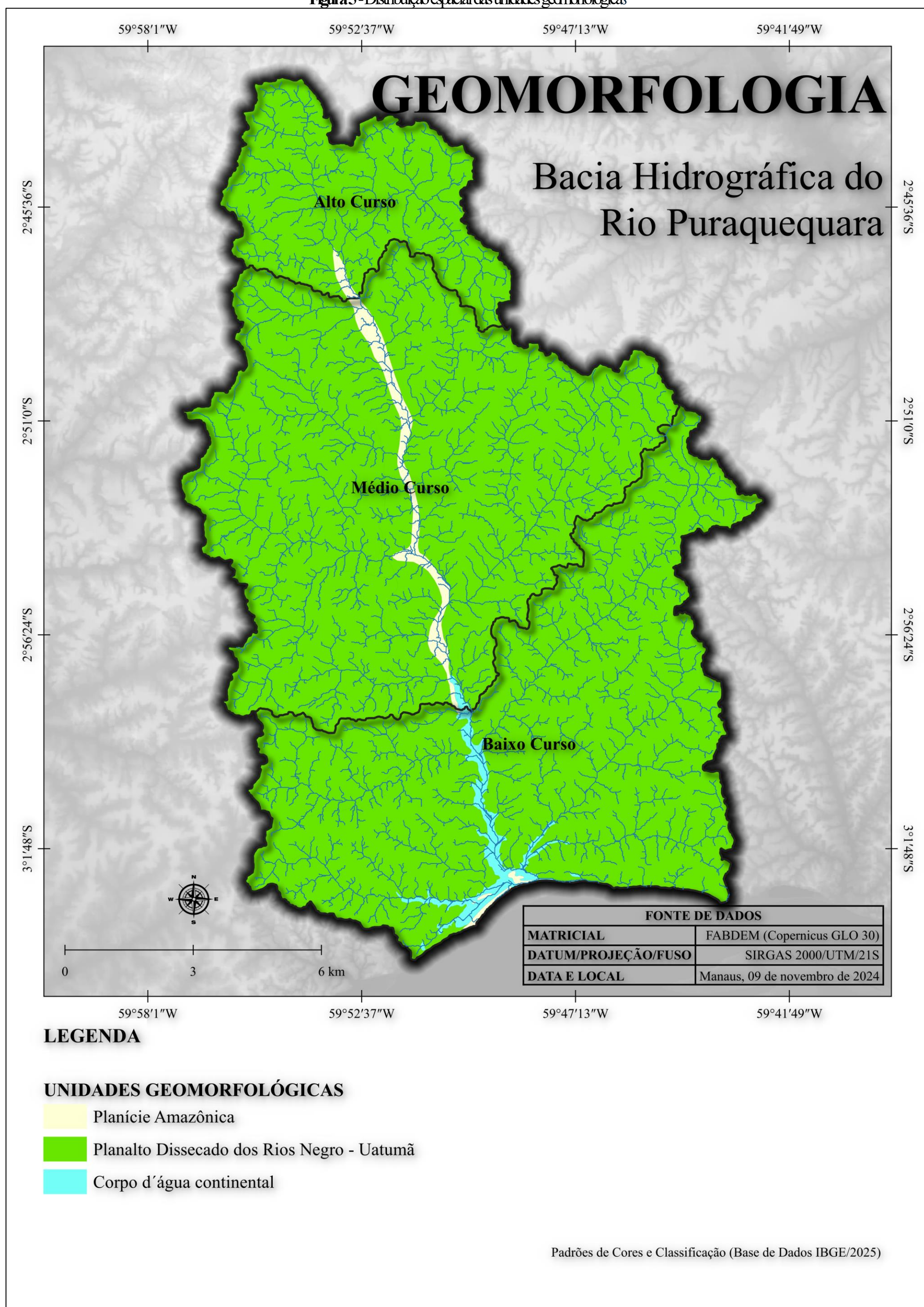
A amplitude altimétrica é de 140 m (147 m nas cabeceiras; 7 m na foz, rio Amazonas). A declividade média é 2,02%, definindo relevo suavemente ondulado, com maior infiltração e menor velocidade de escoamento superficial (Costa *et al.*, 2013; Miranda, 2017; Queiroz Neto *et al.*, 2023). As cotas mais altas concentram-se ao N/NE (zonas de nascente). O relevo suaviza rumo à foz, com planícies fluviais e terraços aluviais (Miranda, 2017; Queiroz Neto *et al.*, 2023). O gradiente de energia ao longo do canal principal, que organiza esse rebaixamento de montante a jusante, é sintetizado no perfil longitudinal da **Figura 4**, no qual se destacam os setores de alto, médio e baixo curso da BHRP.

A **Figura 5** sintetiza graficamente a relação entre a altitude do leito e a extensão do canal principal, permitindo visualizar, de forma integrada, os trechos de maior e menor declividade e as zonas de transição morfológica ao longo do curso fluvial. Desse modo, o perfil longitudinal não atua apenas como recurso de representação, mas como suporte à compartimentação preliminar da BHRP em alto, médio e baixo curso, servindo de base para a articulação com os mapas de declividade e hipsometria e para a organização espacial das análises subsequentes.

Sobre a Formação Alter do Chão, a dissecação prolongada originou planaltos dissecados com colinas de topo convexo e tabular, padrão recorrente no interflúvio Negro–Uatumã (Radam Brasil, 1970; IBGE, 2015), conforme a Figura 5. A literatura cartográfica registra denominações distintas para esse conjunto: Baixos Platôs da Amazônia Centro-Oriental (CPRM, 2006), Planalto Dissecado do Rio Trombetas (Radam Brasil, 1970) e Planalto do Uatumã–Jari (IBGE, 2010). Mesmo assim, ainda é caracterizada como planalto dissecado.

Em termos hipsométricos regionais, tratam-se de terrenos baixos (< 200 m), em que superfícies de topo tabular correspondem a remanescentes de antigas superfícies aplainadas; a rede de drenagem escavou desníveis de 20–50 m nos fundos de vale, frequentemente apoiados por cornijas mais resistentes à erosão, associadas a concreções ferruginosas (Dantas e Maia, 2010).

Figura 5 - Distribuição espacial das unidades geomorfológicas



Na escala da região de Manaus, o relevo revela incisão fluvial elevada, interflúvios tabulares estreitos com orientação preferencial NW–SE e N–S e predominância de baixas declividades; gradientes máximos de 18° ocorrem sobretudo em bordas de terraços, vertentes de topos planos e vertentes dissecadas (Sarges *et al.*, 2011). Para o setor norte da BHRP, análises morfométricas indicam vertentes > 20,2°, compatíveis com critérios legais de APP em topos e encostas íngremes; a proteção desses trechos é crucial para estabilidade de encostas e salvaguarda hídrica (Miranda, 2017). A aparente divergência (18° em cartografia regional vs. > 20,2° em escala de bacia) decorre de diferenças de escala e método, com tendência de mapeamentos regionais subrepresentarem máximos locais de declividade.

A orientação preferencial dos canais reforça o controle estrutural: falhas e fraturas condicionam forma, direção e padrão da drenagem, modulando a dissecação dos platôs e a conectividade entre topos tabulares, vertentes e fundos de vale (Costa e Silva, 2010; Costa *et al.*, 2013; Santos *et al.*, 2010; Furtado *et al.*, 2016).

2.4. SISTEMA HIDROGRÁFICO

Sem sombra de dúvida, abordar o sistema hidrográfico da bacia do Puraquequara demanda mais do que uma simples constatação numérica: trata-se, antes, de reconhecer uma rede de drenagem cuja articulação revela uma notável maturidade geomorfológica, expressa nos seus 544,985 quilômetros de canais. O rio Puraquequara, a rigor, não representa apenas um afluente da margem esquerda do monumental Amazonas; é, sim, o fio condutor, o eixo central onde convergem e se reconfiguram as águas oriundas de 84 cursos fluviais (**Figura 6**) de múltiplas ordens, evidenciando (para além da mera funcionalidade física) o grau de complexidade e o labirinto de relações hidrológicas que caracterizam essa bacia de modo singular (Horbe *et al.*, 2005; Costa e Silva, 2010; Santos *et al.*, 2010; Costa *et al.*, 2013; Furtado *et al.*, 2016; Miranda, 2017; Neves *et al.*, 2020).

Não cabe dissociar a análise da bacia do Puraquequara da lógica classificatória proposta por Strahler (1952), cuja hierarquização, ao assinalar esta bacia como pertencente à sexta ordem, transcende em muito a dimensão do dado meramente formal. O que se tem, aqui, é uma expressão concreta de uma complexidade organizacional intermediária, que se materializa tanto pelo número de bifurcações quanto pela vasta extensão de sua rede fluvial. Em outras palavras, trata-se de um apontador morfométrico cuja importância extrapola o campo da geomorfologia

descritiva, permitindo ao pesquisador entrever nuances fundamentais do estágio de desenvolvimento hidrográfico regional (Costa e Silva, 2010; Miranda, 2017).

Sob o prisma da morfologia fluvial, impõe-se reconhecer que o padrão de drenagem dominante na BHRP é o dendrítico, configuração que, por sua inegável disposição arborescente dos canais, remete imediatamente à imagem dos ramos de uma árvore e evidencia, ainda, uma relativa homogeneidade litológica no substrato subjacente. Tal arranjo, classicamente tipificado na literatura geográfica, é indício de ausência significativa de controle estrutural, ao menos em sua maior parte. Mas, como não raro ocorre nas paisagens amazônicas, há trechos que escapam à regra: observa-se, especialmente na margem esquerda do canal principal, uma clara tendência de orientação dos afluentes na direção NE-SW, sugerindo que o jogo das forças geológicas, longe de ser homogêneo, imprime sua marca em segmentos específicos da bacia (Horbe *et al.*, 2005; Costa e Silva, 2010; Franzinelli e Igreja, 2013; Miranda, 2017; Souza, 2020).

Quando se adentra o detalhamento hidrológico da BHRP, é impossível ignorar a heterogeneidade dos seus afluentes, que se distribuem de maneira significativa ao longo das margens do canal principal. Do lado direito, sobressaem os igarapés Água Branca, Matrinchã, Meada, Ipiranga, João Paulo, Boa Vista e Inferno, compondo um quadro de relativa diversidade hídrica. A margem esquerda, por sua vez, agrega os igarapés Canairu, Branquinho, Mainá e Mainazinho. Não menos relevante, o território abriga os lagos do Puraquequara¹, do Comprido e do Padre, entre os quais o primeiro ocupa posição de destaque, seja pela sua extensão, seja pelo papel multifuncional que desempenha como lócus de lazer, pesca e navegação, imprimindo à paisagem uma dimensão humana e social que transcende a mera importância física dos corpos d'água (Furtado *et al.*, 2016; Miranda, 2017; Neves *et al.*, 2020).

Ao analisar a geometria do canal principal da bacia do Puraquequara, nota-se que o índice de sinuosidade, cifrado em 1,18, aproxima-se consideravelmente do valor de referência 1,0. Este dado, que à primeira vista pode parecer trivial, revela, em verdade, uma marcante tendência à linearidade do traçado fluvial: há relativamente poucas curvas acentuadas, o que implica em dinâmica diferenciada de transporte de sedimentos. Em outras palavras, canais com maior retilinearidade, como é o caso do Puraquequara, tendem a canalizar a energia do fluxo quase integralmente no sentido longitudinal, favorecendo a movimentação de partículas ao

¹ A área corresponde geomorfologicamente a uma ria de foz afogada, a toponímia local a denomina como “lago”. Segundo a classificação geomorfológica do IBGE (2015), este trecho é considerado uma zona de interferência fluvialacustre, o que lhe confere características próprias de lago.

longo de todo o curso, o que impacta decisivamente processos geomorfológicos e ecológicos regionais (Costa e Silva, 2010; Furtado *et al.*, 2016).

No tocante à densidade de drenagem da BHRP, o valor registrado, 0,784 km/km², pode ser considerado francamente baixo, se tomado como referência os parâmetros da classificação morfométrica clássica. Note-se, por exemplo, que para uma bacia ser qualificada como “bem drenada”, seria necessário atingir índices iguais ou mesmo superiores a 3,5 km/km². Tal contexto revela uma paisagem pouco dissecada atualmente, na qual a presença de canais por unidade de área é diminuta (Costa e Silva, 2010; Miranda, 2017; Queiroz Neto *et al.*, 2023). No entanto, conforme assinalado pelo IBGE (2010; 2015), a bacia apresenta forte dissecção, evidenciada pela presença de interflúvios estreitos e alongados.

No âmbito dos parâmetros morfométricos da bacia, a densidade hidrográfica que, em síntese, exprime o número de canais por unidade de área, limita-se a 0,64 canais/km², isto é, menos de um canal por quilômetro quadrado. Este índice, à semelhança do observado na densidade de drenagem, corrobora de maneira enfática a condição de baixa declividade da bacia, reiterando, por conseguinte, o predomínio de superfícies suavemente inclinadas (Costa e Silva, 2010).

No universo dos fenômenos hidrológicos que regem o Puraquequara, um elemento central que se impõe ao olhar investigativo é o regime fluvial, fortemente condicionado, como seria de se esperar, pela sazonalidade das chuvas amazônicas. O ciclo anual inicia-se com o período de enchente, estendendo-se de dezembro a junho, seguido pelo de vazante entre julho e novembro, conformando uma dinâmica que articula tempo e espaço fluvial de modo muito particular. Destaca-se, de modo especial, o baixo curso do rio, próximo à sua foz, onde se manifesta o fenômeno do barramento hidráulico: trata-se de uma sequência de deposição sedimentar promovida pelas águas do próprio Amazonas, resultando na formação de um lago tipo ria que pode atingir até 1 km de largura, cuja influência remonta a 7 km rio acima.

A gênese desse processo está, invariavelmente, associada à presença de uma estrutura de falhamento com orientação WNW-ESSE, elemento tectônico que se estende desde o emblemático Encontro das Águas até a confluência do rio Madeira (Silva, 2005; Horbe *et al.*, 2005; Miranda, 2017; Souza, 2020; Costa, 2023; Queiroz Neto *et al.*, 2023), imprimindo assim profundo controle estrutural à região, e justificando, inclusive, a caracterização da foz do Puraquequara como afogada (**Figura 7**).

Figura 7 - Ria de foz afogada

Foto: DJI Phantom 4 Pro. **Piloto:** Antonio Fábio Sabbá Guimarães Vieira (19/11/2022)

No tocante à qualidade das águas do rio Puraquequara e de seus afluentes, evidencia-se um fator de significativa relevância: a classificação como águas pretas, cuja tonalidade escura não decorre de mera casualidade, mas sim da elevada concentração de ácidos húmicos e fúlvicos, oriundos da incompleta decomposição da matéria orgânica vegetal que permeia as margens e o leito fluvial. Esse traço cromático, longe de ser singular a este sistema, constitui marca registrada de inúmeros rios amazônicos que se infiltram por áreas de floresta equatorial úmida, geralmente assentadas sobre solos ácidos e substancialmente pobres em nutrientes (Horbe *et al.*, 2005; Rocha, 2022; Queiroz Neto *et al.*, 2023).

2.5.CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS

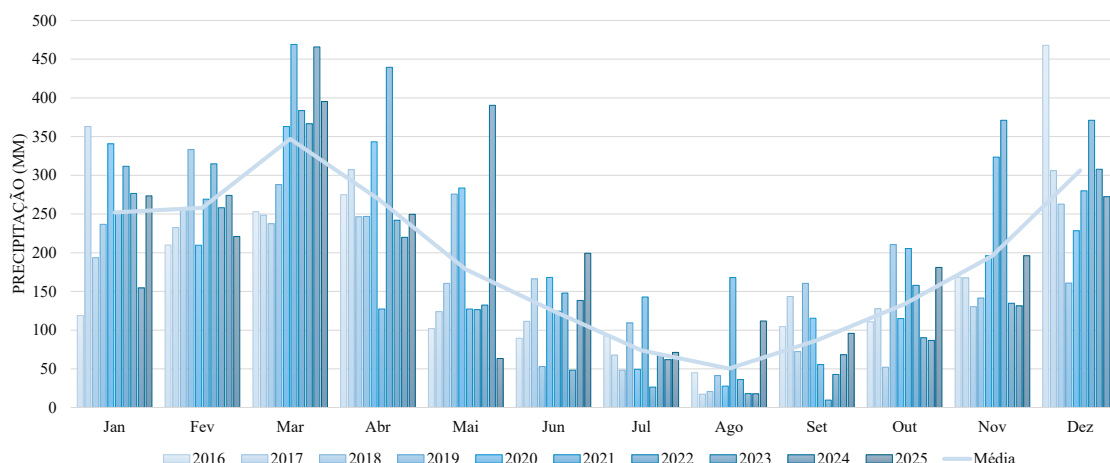
A bacia hidrográfica do Puraquequara encontra-se em pleno domínio do clima equatorial úmido, pertencendo à categoria Af de Köppen e condensando, dessa maneira, várias das experiências atmosféricas mais singulares da Amazônia Central. Trata-se, verdadeiramente, de um ambiente emoldurado por temperaturas persistentemente elevadas, saturação constante de umidade e um regime de chuvas suficientemente fartas a justificar seu enquadramento como

“superúmido”. Não por acaso: a ausência de uma estação seca pronunciada constitui, nesse contexto, um traço definidor, ainda que, em certos meses, os totais pluviométricos possam surpreender por baixar de 60 mm, evidenciando, talvez, a oscilação inerente a sistemas climáticos tropicais (Köppen, 1948; Dubreuil *et al.*, 2018; Horbe *et al.*, 2005; Silva *et al.*, 2010; Rocha, 2022).

No tocante à dinâmica térmica da região, é ilógico não destacar a notável estabilidade que os registros apontam: as médias anuais permanecem insistentemente entre 25°C e 26,7°C, e a amplitude intersazonal raramente transgride a barreira dos 2°C. Se observarmos os extremos mensais, de 24°C a 31,4°C (Vieira, *et al.*, 2024), fica claro que tal constância térmica encontra sua explicação primeira na localização geográfica especial da área, virtualmente colada à linha do Equador. Esta proximidade garante, ano após ano, uma insolação homogênea e, por conseguinte, um padrão climático quase inalterado, em claro contraste com as variações mais intensas observadas em latitudes maiores (Silva *et al.*, 2010; Rocha, 2022; Queiroz Neto *et al.*, 2023).

No que diz respeito ao regime das chuvas, depara-se com uma das facetas mais desafiadoras do balanço hídrico amazônico. Ainda que a média anual flutue em torno de 2.300 mm, a irregularidade na distribuição mensal é regra: fevereiro, março e abril despontam como meses de picos expressivos, superando por vezes os 300 mm, ao passo que julho, agosto e setembro revelam uma estiagem relativa, termo este que se presta a diferenciar a diminuição de chuvas de uma ausência absoluta, pois mesmo nos “meses secos” a água ainda marca presença significativa na paisagem (Souza *et al.*, 2008; Rocha, 2022; Queiroz Neto *et al.*, 2023).

Quando se observa a pluviometria registrada em Manaus, cidade cujos padrões influem decisivamente sobre o Puraquequara, vê-se que a variação histórica anual vai de 1.952 mm a 2.671 mm, permitindo uma gradação dos anos em secos, habituais e chuvosos (Andrade e Aleixo, 2019). O ciclo anual é marcado por uma ascensão inequívoca das chuvas entre dezembro e maio e por um intervalo de recuo entre junho e outubro (com novembro em posição intermediária). As séries históricas do INMET (1931–2020) reafirmam tal padrão: a elevação do volume precipitado começa em novembro, chega ao ápice de março a abril e cede gradualmente após maio (**Figura 8**).

Figura 8 - Climatograma pluviométrico mensal (2016–2025)

Fonte: Inmet. **Organização:** o autor (2026).

Entre os meses de dezembro e março concentram-se os maiores volumes pluviométricos, sendo março o mais chuvoso da série temporal, com valores frequentemente acima de 350 mm e picos superiores a 450 mm em alguns anos. Esse padrão é confirmado pela média climatológica, que evidencia uma ascensão gradual a partir de dezembro, atingindo o ápice em março e declinando a partir de abril. Já julho e agosto correspondem aos meses mais secos, com totais em torno de 100 mm e, em alguns anos, próximos de 50 mm.

A dinâmica da insolação reforça esse quadro: os picos ocorrem entre setembro e outubro; os menores índices, de dezembro a fevereiro. Tal conjuntura, conjugada a temperaturas sempre elevadas, leva a taxas expressivas de evapotranspiração, processo de peso considerável no equilíbrio hídrico da região e na sustentação da vida vegetal (Rocha, 2022; Queiroz Neto *et al.*, 2023).

A umidade relativa do ar, constantemente acima dos 75%, configura não apenas um pano de fundo climático, mas uma verdadeira força estrutural na conformação do ambiente amazônico. A força da vegetação tropical úmida, tão característica da região, ajuda a explicar parte dessa situação. Mas o impacto vai além das plantas: ela exerce um papel fundamental nos processos de água, na formação do solo e nas trocas químicas que acontecem na natureza. No final das contas, tudo isso cria uma conexão muito próxima, e muitas vezes difícil de perceber, entre o ar, a água, o solo e os seres vivos. (Souza *et al.*, 2008; Rocha, 2022; Queiroz Neto *et al.*, 2023).

Cumprе ressaltar, neste panorama climático, uma inflexão recente que tem mobilizado crescente atenção entre estudiosos da região: dados comparativos indicam que, nas últimas

décadas, houve uma redução no número de dias chuvosos anuais, passando de 190 para 178 dias entre os períodos de 1901–1994 e 1986–2015. A rigor, tal fenômeno não se limita à dimensão aritmética da precipitação, mas sugere uma concentração dos eventos pluviais em intervalos mais restritos, com potencial, e inquietante, intensificação de episódios extremos, implicando desafios adicionais para a compreensão e o manejo dos sistemas ambientais amazônicos (D'ávila Junior e Vieira, 2019).

2.6. CARACTERÍSTICAS PEDOLÓGICAS

A geologia que sustenta a BHRP, em combinação com o clima declaradamente quente e úmido, não “favorece”: impõe, quase como exigência natural, o predomínio de perfis pedológicos tipicamente tropicais. Não se trata de mera derrocada mineral, mas de uma morfodinâmica marcada pela ação do intemperismo, processo que, mais do que indicar passagem do tempo, reflete a lógica destrutivo-constructiva do trópico (Costa *et al.*, 2013; Gonçalves e Miranda, 2014; Neves *et al.*, 2020). Nesse caleidoscópio formam-se, por força dos processos, e não por acaso climático ou geológico, os Latossolos Amarelos e os Espodossolos: ambos paradigmáticos do metabolismo edáfico tropical e de sua profunda filiação ao ciclo da degradação e reorganização de materiais (Costa *et al.*, 2013; Gonçalves e Miranda, 2014; Neves *et al.*, 2020). É nas camadas da Formação Alter do Chão que esses solos revelam sua maior expressão: espessos, profundos, de drenagem notável e carregando, no horizonte B latossólico, a marca do tempo geológico convertido em argila (Teixeira *et al.*, 2010).

Os Latossolos Amarelos (**Figura 9**), que não apenas recobrem, mas dominam a paisagem da BHRP, são testemunhas vivas do intemperismo extremo: perfis espessos, quase sempre bem drenados, textura que oscila do argiloso ao muito argiloso e coloração amarela dada não só pela presença, mas pelo predomínio, dos óxidos e hidróxidos de ferro. Quimicamente, denunciam uma pobreza radical: fertilidade natural ínfima, acidez elevada (com pH notavelmente baixo), alumínio trocável em níveis tóxicos e bases trocáveis virtualmente residuais (Mafrá *et al.*, 2002; Horbe *et al.*, 2005; Queiroz Neto *et al.*, 2023). A clássica trilogia de horizontes A–Bw–C, com diferenciação minimalista, ilustra não apenas o grau de intemperismo, mas a quase negação da estratificação típica das zonas temperadas: aqui, o desgaste supera a renovação, e o homogêneo triunfa (Teixeira *et al.*, 2010).

59°58'1"W 59°52'37"W 59°47'13"W 59°41'49"W



CLASSES DE SOLOS

- | | |
|---|---|
|  | LAd - Latossolo Amarelo Distrófico |
|  | LAW - Latossolo Amarelo Ácrico |
|  | RYve - Neossolo Flúvico Ta Eutrófico |
|  | RQg - Neossolo Quartzarênico Hidromórfico |
|  | Corpo d'água continental |
|  | Área Urbana |

Padrões de Cores e Classificação (Base de Dados IBGE/2025)

A fração argilosa, por sua matriz mineralógica, é dominada pela caulinita, ladeada por traços de goethita, hematita e, ocasionalmente, gipsita. Sobre esse pano de fundo formam-se, no topo, crostas lateríticas, testemunhos materiais de um passado pedogenético ainda incompleto, de intensa meteorização e, frequentemente, truncamento. Cabe lembrar: na Formação Alter do Chão, essas crostas e perfis lateríticos ilustram não o termo de um ciclo, mas a transição, cobertas ainda por Latossolos e Espodossolos que denunciam o inacabamento do processo (Horbe *et al.*, 2005).

A lateritização, aqui, não é processo marginal, mas central: é o próprio motor de transformação do solo. A intensa alternância de umidade, calor e tempo gera concentração de óxidos de ferro e alumínio, mineralogia polida pela ação incessante das águas, e que, por vezes, confere ao perfil lateral enriquecimento em caulinita, quartzo, goethita, hematita ou gipsita, numa paleta mineralógica que denuncia a engenhosidade geoquímica do trópico (Horbe *et al.*, 2005; Gonçalves e Miranda, 2014).

Topograficamente, o relevo demarca transições: ao descer das partes altas para as encostas úmidas, observamos a substituição dos Latossolos por solos plínticos, domínio do ferro, da formação de plintita sob regimes saturados, resultado visível da dialética entre água, gravidade e matéria mineral (Schaefer *et al.*, 2017).

Os Espodossolos, em oposição à maciça presença dos Latossolos, surgem como exceções eloquentes: desenvolvem horizontes espódicos em que se acumulam volumes expressivos de matéria orgânica, compostos de alumínio e ferro, conferindo ao perfil, além da cor e textura, uma real singularidade funcional (Horbe *et al.*, 2005; Costa *et al.*, 2013; Queiroz Neto *et al.*, 2023). Sua distribuição, na região de Manaus, acompanha o traço dos rios e as bordas das encostas, formando perfis arenosos de notável espessura. Nessas posições rebaixadas, sob drenagem imperfeita, reforçam sua condição: acidez extrema, fertilidade quase nula, textura superficial arenosa. O Espodossolo, assim, é menos resultado de um “ambiente” e mais expressão do encontro entre restrição hidrológica e fluxo de detritos orgânicos (Vieira, 2008; Teixeira *et al.*, 2010).

Nas bordas ribeirinhas e planícies de inundação, a lógica se inverte: Neossolos Flúvicos e Gleissolos ocupam o espaço, moldados pela imprevisibilidade do regime hidrossedimentar e pelos humores dos aportes fluviais (Schaefer *et al.*, 2017). As margens dos canais hospedam Neossolos Quartzarênicos, filiados à matriz arenosa dos depósitos recentes. A eutrofia desses solos, quando presente, é apanágio dos rios barrentos, rios do Solimões–Amazonas, portadores

de sedimentos orgânicos e minerais, ao passo que nos domínios das águas pretas, com sua escassa carga sólida e abundância de ácidos humificados, predomina a distrófia (Embrapa, 2013).

No plano hidrogeoquímico, o solo dita a química do rio: acidez, pobreza em bases e nutrientes explicam as águas diluídas e ácidas que, ao longo do Puraquequara, se impõem como norma, não como exceção, do ambiente amazônico (Sioli, 1950; Horbe *et al.*, 2005; Miranda, 2017). Nas áreas de terra firme, a infiltração eficiente dos Latossolos, somada ao relevo suave, garante recarga dos aquíferos e limita o escoamento superficial. Porém, a diversidade é a marca: crostas lateríticas e plintitas rasas intervêm pontualmente, modulando a infiltração e, por vezes, invertendo a dinâmica fundamental, com intensificação do *run-off*, a expressão última da complexidade e do caráter multifacetado do sistema edáfico-hídrico amazônico (Horbe *et al.*, 2005; Schaefer *et al.*, 2017).

Para concluir a presente seção, o que se observa na BHRP é um mosaico dinâmico, expressando, mais do que uma soma de tipos de solo, a concretização geomorfológica de uma paisagem marcada por dialética constante entre estrutura, tempo, energia e matéria. Essa diversidade, longe de ser mera curiosidade taxonômica, materializa a pulsação profunda do ambiente amazônico, em permanente reconfiguração, seja nos Latossolos profundos e homogêneos, nas crostas lateríticas fragmentadas, no surgimento de solos plínticos nas encostas saturadas, nos Espodosolos arenosos das depressões, ou ainda nos Neossolos e Gleissolos das várzeas e canais, sempre respondendo à natureza do rio: barrento ou preto, denso ou rarefeito (Mafra *et al.*, 2002; Horbe *et al.*, 2005; Vieira, 2008; Teixeira *et al.*, 2010; Costa *et al.*, 2013; Embrapa, 2013; Schaefer *et al.*, 2017; Queiroz Neto *et al.*, 2023).

2.7. COBERTURA VEGETAL

Ao analisar a “cobertura vegetal” da BHRP, não basta listar classes florísticas; é imperioso, em chave dialética, explicitar a lógica que as atravessa. Predomina, aqui, a Floresta Ombrófila Aberta (FOA) (**Figura 10**), feição amazônica por excelência, cuja tessitura se revela em dossel descontínuo, emergentes que se projetam além dos 30 m e exuberante diversidade florística (Horbe *et al.*, 2005; Pinheiro Júnior *et al.*, 2005; IBGE, 2019; Neves *et al.*, 2020; Souza, 2020). Essa constatação só adquire pleno sentido quando reinscrita na complexa constelação amazônica, mosaico de matas de terra firme, várzeas e igapós que, superpostas, orquestram o metabolismo socioecológico regional (RadamBrasil, 1975; Pires, 1973; IBGE, 2019).



TIPOS DE VEGETAÇÃO

- Padrões de Cores e Classificação (Base de Dados IBGE/2023)

A distribuição espacial dessa cobertura, longe de homogênea, expõe uma assimetria gritante. No flanco oriental, mais de 98% da vegetação original persiste, não por acaso, pois a presença de bases de treinamento do Exército Brasileiro opera como barreira humana à própria degradação humana. Em contrapartida, o setor ocidental abriga a Reserva Florestal Adolpho Ducke (RFAD), alçada a Área de Proteção Ambiental pelo Decreto Municipal 1.502 (27 mar. 2012). Ali, mosaicos florestais (**Figura 11**) de alta relevância ecológica compõem precioso bastião de biodiversidade urbana para Manaus (Horbe *et al.*, 2005; Pinheiro Júnior *et al.*, 2005; Costa e Silva, 2010; Neves *et al.*, 2020; Souza, 2020; Costa, 2023). Nos trechos preservados, o sub-bosque adensa-se, emergentes rasgam o dossel e espécies-símbolo: matamatá-preto, rosa-dinha, cardeiro, capiúba, louro-preto, veem a vitalidade do sistema (Radambrasil, 1975).

Figura 11 - Vista do dossel florestal na RFAD



Foto: o autor (2022)

Todavia, o mesmo setor ocidental evidencia o lado sombrio da modernização: cerca de 3.547,6 ha de floresta foram suprimidos em prol de usos urbanos, agrícolas ou pastoris. Tal conversão de solo, longe de neutralidade técnica, instaura uma cascata de efeitos: perda de habitat, fragmentação, perturbação dos ciclos hidrológicos e degradação da qualidade da água (Pinheiro Júnior *et al.*, 2005; Moreira, 2012; Miranda, 2017; Neves, 2018; Neves *et al.*, 2020; Costa, 2023).

A vegetação ciliar, guardiã dos cursos d'água, assume papel vital ao estabilizar margens, filtrar sedimentos e oferecer refúgio faunístico. Ainda assim, nas áreas com características urbanas, essa pele verde foi amputada ou se encontra, de certa forma, cicatrizada, fragilizando funções ecológicas indispensáveis (Pinheiro Júnior *et al.*, 2005; Moreira, 2012; Miranda, 2017; Neves *et al.*, 2020; Souza, 2020). No plural ecossistêmico da bacia, coexistem diferentes ambientes: a terra firme, sobre os platôs da Formação Alter do Chão, onde solos bem drenados sustentam floresta ombrófila, densa ou aberta, com sub-bosque fechado e árvores emergentes altivas (Radambrasil, 1975); a várzea, domínio ritmado pelas cheias sazonais do Amazonas; e o igapó, planícies periodicamente inundadas, onde, em rios de águas pretas, a escassez de sedimentos eleva a acidez e restringe a fertilidade (Pires, 1973). Durante a enchente, a lâmina d'água se impõe; na vazante, praias arenosas emergem, lembrando-nos de que, neste espaço, solidez e fluidez são fases de um mesmo processo (Pires, 1973).

2.8. PRESSÕES HUMANAS E MUDANÇAS AMBIENTAIS

Antes de iniciar a descrição do processo de ocupação urbana na BHRP, é fundamental destacar que este trabalho, embora aborde essa questão de forma tangencial, apoia a perspectiva crítica proposta por Souza (2019), que enfatiza a necessidade de considerar as relações sociais e as assimetrias de poder nos estudos ambientais. Compreende-se, dessa forma, que a dimensão humana não é uma entidade monolítica; ao contrário, é composta por diversos grupos sociais com interesses e capacidades de influência distintos. Mesmo que, em linhas gerais, a proposta desta seção seja focada nos aspectos físicos, sempre que cabível, será explicitado, de maneira modesta, como essas relações sociais podem influenciar a dinâmica da paisagem na BHRP.

A gestão territorial da BHRP lastra o padrão histórico de planejamento urbano da cidade de Manaus. Para além do escopo central desta tese, é relevante observar que a atuação do Estado na organização territorial ocorre sobretudo de forma reativa, após a consolidação das ocupações urbanas (Molinari, 2024). Este padrão é provado pelo fato de que o PDUAM teve seu primeiro registro público apenas em 2002, 35 anos após a implantação da ZFM. (PDUAM, 2002). Esta última é descrita como o principal catalisador do crescimento demográfico da cidade, processo que tem sido atrelado à degradação dos ambientes naturais (Nogueira *et al.*, 2007; Alves *et al.*, 2020; Silvestrim *et al.*, 2021; Silva e Scudeller, 2022).

Nesse contexto, tal dinâmica de ocupação se materializa na BHRP através de diferentes padrões de uso do solo. As áreas mais valorizadas apresentam infraestrutura urbana consolidada e na maioria das vezes estão associadas a empreendimentos que causam alterações impactantes na paisagem. Em compensação, as áreas menos valorizadas, frequentemente desprovidas de serviços básicos e infraestrutura adequada, são ocupadas pela população mais vulnerável, que acaba sofrendo duplamente: pela carência de serviços e pelos impactos ambientais gerados.

Essa problemática pode ser entendida como uma questão escalar, pois, em comparação com outras áreas da cidade, o bairro que é batizado com o nome da bacia e os bairros adjacentes (Jorge Teixeira e Distrito Industrial), parcialmente inseridos na BHRP, não apresentam, na atual circunstância, o idêntico padrão de progresso. Enquanto algumas regiões da cidade desfrutam de investimentos em infraestrutura e serviços, esses bairros, apesar de estarem localizados em uma área de grande potencial, ainda enfrentam desafios que poderiam ter sido vencidos após cinco décadas de funcionamento da ZFM.

2.8.1. Urbanização e reconfiguração espacial

Mais que um ponto no plano bidimensional, o Puraquequara é um espaço de memórias, camadas e conflitos. A bacia do Puraquequara não pode ser reduzida a um simples recorte físico sobre o território, pois se configura como um autêntico palimpsesto, onde a sobreposição de camadas histórico-culturais se entrelaça de modo indissociável às pressões humanas mais recentes. Essa dinâmica permanente redefine usos do solo, padrões de infraestrutura e a própria qualidade ambiental, compondo uma dialética viva entre o legado cultural e os imperativos da urbanização contemporânea. Tal perspectiva ecoa a noção de “ambiente integral”, na qual os processos naturais e sociais formam uma totalidade inseparável, rejeitando leituras simplistas ou dicotômicas do espaço geográfico (Souza, 2022). A própria toponímia, Puraquequara, é emblemática: ao derivar da fusão dos termos tupis *poraquê* (enguia elétrica) e *quara* (morada), ultrapassa a função de nomeação para condensar a relação ancestral com a fauna local, significando literalmente “lugar das enguias elétricas” (Gomes *et al.*, 2020).

Quando o nome se faz memória, a paisagem é também cultura e história viva. O vínculo entre natureza, cultura e memória transborda a etimologia do nome. Depoimentos de moradores recolhidos em campo evidenciam que o poraquê permanece central no imaginário do lago e dos igarapés adjacentes (Andrade, 2013). Essa dimensão simbólica, entranhada nas práticas

cotidianas, converge com registros do século XVIII que já destacavam a importância pesqueira do Puraquequara (Gomes *et al.*, 2020). Desse modo, paisagem, fauna e cultura refletem-se e se realimentam, formando uma tapeçaria de sentidos em que fios antigos e recentes não podem ser dissociados sem perda do significado coletivo. Trata-se de um processo que, para Lima (2025), manifesta o “agora nas cidades”, quando fenômenos naturais e experiências sociais entrelaçam-se no presente dos espaços.

As cicatrizes do tempo sobre a BHRP são feitas de ciclos, deslocamentos e reinvenção social. A trajetória ocupacional da bacia se estrutura em ciclos, resultado de interações entre fatores ambientais e decisões sociais. Após o declínio do ciclo da borracha no final do século XIX e início do XX, houve sucessivos movimentos migratórios de famílias vindas de áreas ribeirinhas do Amazonas e arredores, os chamados beiradões, para as várzeas do rio Amazonas e, posteriormente, para o entorno do lago do Puraquequara, em busca de refúgio diante das cheias e do fenômeno da terra-caída (Neves, 2018; Andrade e Ferraz, 2020; Queiroz Neto, 2023). Uma transição vital ocorre a partir da década de 1970, com o incentivo de missionários europeus e lideranças locais para a mudança da várzea para terra firme, culminando na fundação da vila do Puraquequara nas margens do lago, movimento essencial para assegurar segurança residencial frente às inundações (Andrade e Ferraz, 2020). Cada ciclo migratório causa marcas tangíveis e simbólicas, redefinindo continuamente a configuração social e ambiental da bacia.

Toda fronteira urbana é, também, fronteira de sentidos, expectativas e contradições. A década de 1990 retrata um divisor de águas para as dinâmicas espaciais da vila do Puraquequara. A incorporação do distrito ao Plano Diretor Urbano, associada à elevação administrativa a bairro (Leis 671/02 e 2.924/95), resultou de uma estratégia estatal orientada à expansão da malha urbana de Manaus. Essa iniciativa, combinada à pavimentação e abertura da Estrada do Puraquequara (**Figura 12**), consolidou a integração funcional e simbólica do local ao núcleo metropolitano, ampliando acessibilidade e intensificando o fluxo de pessoas de diferentes origens socioeconômicas, com aceleração do crescimento demográfico (Neves, 2018; Andrade e Ferraz, 2020; Queiroz Neto, 2023). O processo revela como políticas urbanas e intervenções infraestruturais podem, simultaneamente, promover integração e nutrir novas vulnerabilidades, cenário que Lima (2025) descreve como gerador de “geoansiedade”, quando a expectativa de melhoria convive com riscos e tensões na periferia urbana.

Figura 12 - Abertura da Estrada do Puraquequara (década de 1970)



Fonte: Retirando do site Instituto Durango Duarte. Foto: Corrêa Lima. Acervo: Jorge Bastos de Oliveira/DER-AM

O passado econômico de Manaus reverbera como força modeladora do presente na bacia do Puraquequara. No quadro mais amplo da urbanização metropolitana, dois marcos históricos e econômicos são fundamentais para explicar a direção e intensidade das transformações observadas: o ciclo da borracha (1870–1920), propulsor do crescimento populacional de Manaus, e a criação da Zona Franca (1967), cujo dinamismo produtivo permanece estruturante da expansão territorial, impulsionando processos de urbanização frequentemente desordenada e agravando a sobrecarga sobre as infraestruturas urbanas (Mady *et al.*, 2025; Silva e Scudeller, 2022; Sousa, 2022). Esses marcos ilustram o modo pelo qual políticas públicas, interesses econômicos globais e decisões territoriais se articulam em trajetórias urbanas marcadas tanto pelo potencial integrador quanto por processos de precarização e tensão socioespacial, em sintonia com a crítica de Souza (2022) à simplificação dos fenômenos urbanos.

Na fronteira entre o rural e o urbano, o Puraquequara revela múltiplas faces e desafios. O avanço urbano assume na região a feição de uma fronteira móvel entre o urbano e o rural, conformando um espaço de múltiplas funcionalidades e usos (Silva *et al.*, 2023). O bairro Puraquequara, situado na zona leste, resulta de ocupações irregulares e ocupava, originalmente, o limite entre a malha urbana e áreas florestais (Almeida e Aleixo, 2024). A expansão urbana acompanhou o traçado da rede viária, em especial a Estrada do Puraquequara e a rodovia AM-010, que estruturaram a acessibilidade (**Figura 13**). A ocupação ao longo dessas vias impulsionou a expansão da mancha urbana em direção ao norte, especialmente sobre áreas antes cobertas por floresta, acentuando a ocupação irregular e a supressão da vegetação. Ramais secundários, frequentemente precários, intensificam o isolamento de comunidades durante o inverno amazônico (Neves, 2018; Queiroz Neto, 2023). Em paralelo, o transporte fluvial permanece estratégico para deslocamentos, abastecimento e escoamento da produção, mas a navegação é afetada por secas sazonais e pela descida dos níveis do rio (Queiroz Neto, 2023).

Figura 13 - Placa de sinalização da Área de Expansão do Distrito Industrial



Foto: o autor (2025)

O recuo da floresta é a materialização silenciosa das escolhas territoriais. Estudos utilizando sensores remotos e sistemas de informações geográficas para os anos de 2005, 2010 e

2016 revelam a predominância de vegetação primária, ainda que com redução progressiva provocada pela ampliação do solo exposto e da mancha urbana (Neves, 2018; Neves *et al.*, 2020; Queiroz Neto, 2023). O avanço urbano é particularmente acentuado no setor ocidental da bacia, onde se nota acréscimo de 5,1% no solo exposto entre os anos de 2010 e 2016, relativos a processos de desmatamento, uso agrícola e retirada de areia para a construção civil (Neves *et al.*, 2020; Queiroz Neto, 2023). No período de uma década, áreas desmatadas somaram mais de 16 km²; a vegetação secundária não compensa integralmente a perda da floresta primária, cuja presença remanescente é decisiva para a estabilidade ecológica e para a manutenção da qualidade hídrica (Neves, 2018; Queiroz Neto, 2023).

A BHRP sofre pressões humanas constantes, sobretudo em sua porção ocidental (Neves *et al.*, 2020; Queiroz Neto *et al.*, 2021). O avanço urbano desordenado, intensificado desde a década de 1990, somado à ausência de planejamento e à precariedade dos serviços públicos de saneamento, provocou o lançamento de esgoto doméstico in natura nos igarapés, disposição inadequada de resíduos sólidos, erosão, assoreamento e degradação da vegetação ciliar (Souza Filho *et al.*, 2018). Monitoramentos ambientais indicam contaminação em diversos pontos, com altas concentrações de amônia, nitrato e coliformes fecais nas áreas urbanizadas. A supressão da vegetação e a impermeabilização do solo alteram a dinâmica hidrológica, com aumento do escoamento superficial e redução da recarga dos aquíferos (Neves, 2018; Queiroz Neto, 2023), expondo um metabolismo socioambiental que tende ao desequilíbrio.

Se, no passado, a abundância de água moldou o modo de vida e a ocupação na bacia do Puraquequara, hoje o desafio central reside na gestão integrada de seus recursos hídricos diante das pressões urbanas e ambientais. A gestão da água assume caráter prioritário, exigindo ações articuladas de planejamento territorial, regularização fundiária, implantação de infraestrutura de saneamento, restauração de áreas degradadas e fortalecimento dos mecanismos de fiscalização ambiental. Nesse contexto, o Comitê da Bacia Hidrográfica do Puraquequara, instituído pelo Decreto Estadual nº 37.412 de 25 de novembro de 2016, representa uma instância de gestão participativa, reunindo Estado, usuários e sociedade civil na formulação de estratégias para a conservação e o uso sustentável dos recursos hídricos. Essa perspectiva dialoga com a noção de “ambiente integral” proposta por Souza (2019), ao reconhecer a indissociabilidade entre processos naturais, decisões sociais e práticas de governança territorial.

METODOLOGIA

A falta de dados consistentes na Amazônia interfere diretamente na metodologia, que orienta resultados e garante confiabilidade. Tomando como referência o conceito de sensibilidade da paisagem, a proposta é abordar a bacia do Puraquequara pela lente da resistência, integrando práticas locais, processos ecológicos e ajustes metodológicos que respondam a essas sensibilidades.

Aporte da profa. Dra. Mircia Ribeiro Fortes durante participação na banca de qualificação, ago./2023.

3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A metodologia constitui a espinha dorsal da pesquisa (Mustafa, 2023), fornecendo o suporte estrutural que organiza os procedimentos e sustenta a construção dos resultados e das interpretações ao longo da tese.

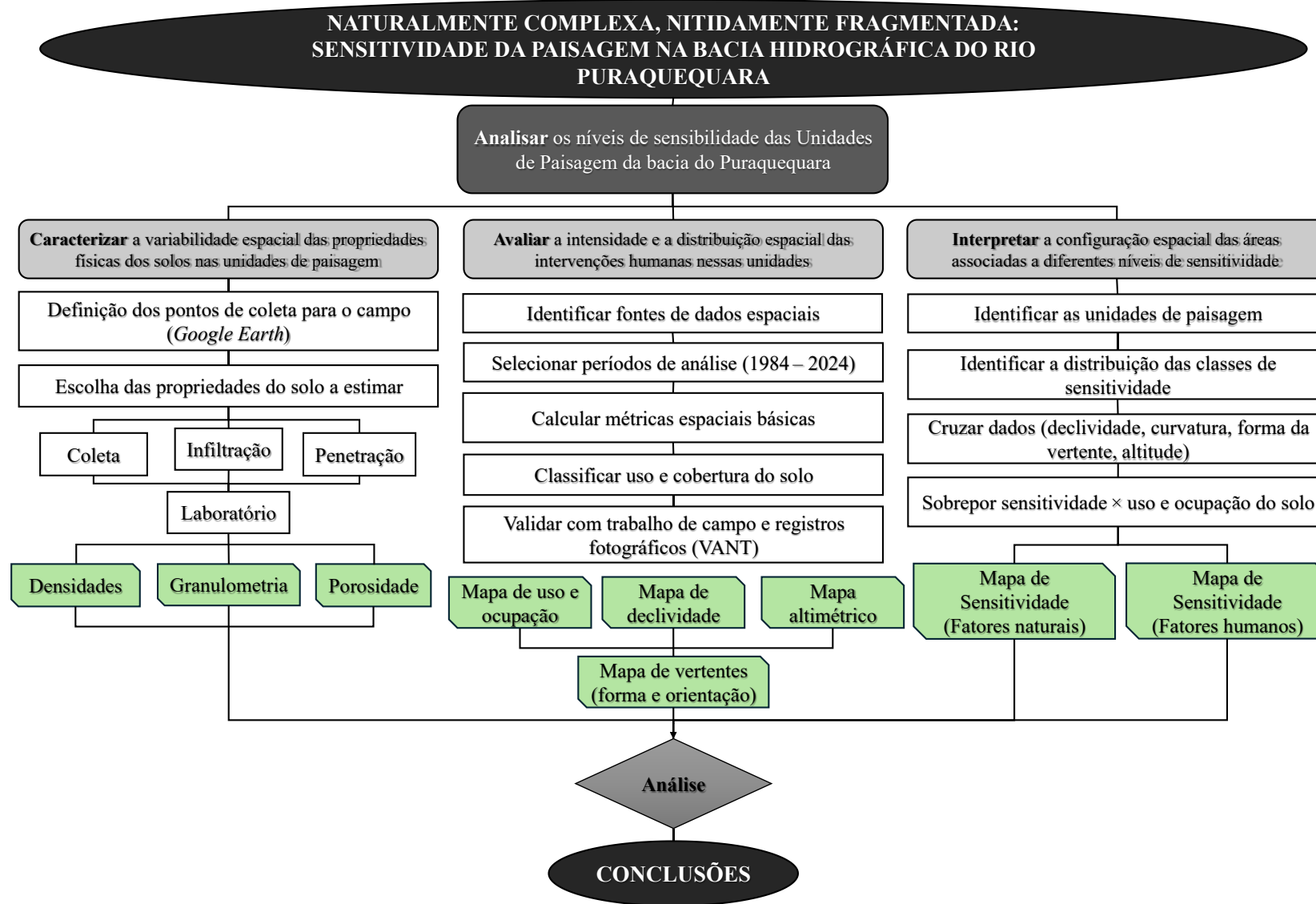
Os procedimentos foram organizados em etapas, coleta de dados, análise e interpretação, orientadas ao cumprimento dos objetivos específicos e geral da pesquisa. A abordagem englobou a identificação de processos dominantes e suas interações com fatores de alta magnitude e baixa frequência, como inundações sazonais e mudanças climáticas, além da variação da sensibilidade entre as zonas da bacia e ao longo do curso do rio. Isso permitiu analisar criticamente o funcionamento do relevo e a organização espacial dos processos atuantes, em diálogo com as dinâmicas ambientais da Amazônia.

A estrutura metodológica baseou-se em quatro frentes: elaboração de mapeamentos, levantamentos de campo, avaliação de processos erosivos e análise climática. Foram realizadas modelagens do escoamento superficial, análises da conectividade da paisagem e a identificação de fatores que limitam a transmissão de energia e matéria no interior da BHRP. O objetivo foi compreender como a bacia responde às mudanças, especialmente no que se refere às diferenças de sensibilidade entre as margens esquerda e direita, aspecto fundamental para a interpretação da dinâmica da paisagem.

3.1. FLUXOGRAMA DAS ETAPAS METODOLÓGICAS

Para facilitar a compreensão da estrutura metodológica adotada nesta tese, elaborou-se um fluxograma que abrange e, ao mesmo tempo, sintetiza as principais etapas do estudo. O processo inicia-se com a definição do título e dos objetivos; realiza-se a busca de textos, prossegue-se pela coleta de dados e análises, culminando na apresentação dos resultados, seguidos da discussão e validação dos achados (*Figura 14*)

Figura 14 - Estrutura metodológica para análise da sensibilidade da paisagem



A representação gráfica e esquemática permite uma compreensão clara e organizada das ações desenvolvidas, destacando os processos-chave que nortearam a pesquisa e sua execução prática. A partir dessa estrutura geral, avançam-se para os procedimentos técnicos que operacionalizam a análise espacial e geomorfológica da BHRP, os quais constituem a base empírica sobre a qual se apoiam as interpretações conceituais e analíticas desenvolvidas nas seções subsequentes.

3.2. BASE CARTOGRÁFICA E DELIMITAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PURAQUEQUARA

A delimitação da área de estudo e a caracterização da base geomorfológica da BHRP constituem etapas operacionais de apoio aos três objetivos específicos da pesquisa. Esses procedimentos permitem representar o relevo, a rede de drenagem e a organização espacial da bacia, fornecendo suporte necessário à localização dos pontos amostrais, à distinção entre margens e posições geomorfológicas, à interpretação das variações físicas observadas nos solos e à elaboração dos mapas de sensibilidade da paisagem.

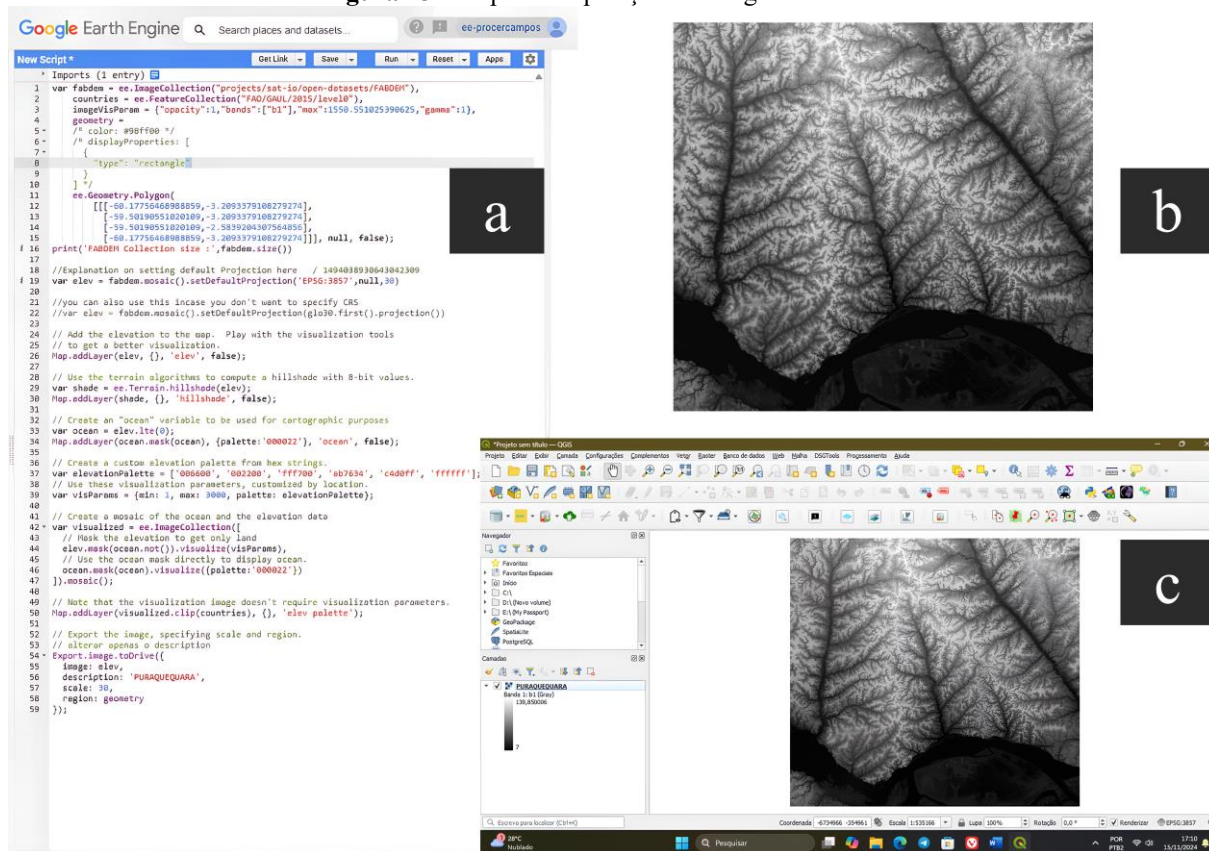
3.2.1. Critérios de seleção e preparo do Modelo Digital de Elevação (FABDEM)

Para a caracterização do relevo e a delimitação da área de drenagem da BHRP, foi adotado um Modelo Digital de Elevação (MDE) que atendesse às exigências de representação topográfica compatíveis com a escala de análise e com as características físicas da bacia. A escolha do MDE considerou a necessidade de reduzir interferências associadas à cobertura vegetal e garantir maior fidelidade na extração de parâmetros geomorfológicos e hidrológicos utilizados nas etapas subsequentes. (Alves Sobrinho *et al.*, 2010; Adami *et al.*, 2011).

Com base nesses critérios, optou-se pela utilização do FABDEM, derivado do Copernicus DEM, por se tratar de um modelo que aplica algoritmos específicos para a remoção de artefatos relacionados à vegetação e a edificações. Essa característica mostrou-se particularmente relevante para a BHRP, sobretudo em função da ampla cobertura vegetal presente na margem esquerda da bacia, permitindo uma representação mais próxima da superfície do terreno (Teleti e Luis, 2013; Melo *et al.*, 2021; Marsh *et al.*, 2023; Bielski *et al.*, 2024).

O processamento do MDE seguiu uma abordagem integrada entre o Google Earth Engine (GEE) e o QGIS. Inicialmente, o FABDEM foi adquirido e recortado no ambiente do GEE, onde também foram realizados os ajustes de projeção cartográfica compatíveis com a área de estudo. Em seguida, procedeu-se à inspeção visual do modelo com o objetivo de verificar a coerência da representação do relevo e identificar eventuais inconsistências antes de sua utilização nas análises geomorfológicas (**Figura 15**).

Figura 15 - Etapas de aquisição da imagem FABDEM



Organização: o autor (2026)

Após essa etapa de verificação preliminar, o MDE foi exportado do GEE em formato *GeoTIFF* e incorporado ao ambiente QGIS 3.36, onde passou a constituir a base topográfica para a extração da rede de drenagem, a delimitação da bacia hidrográfica e a geração dos produtos morfométricos empregados na pesquisa (declividade, hipsometria, curvaturas e parâmetros hidrológicos).

3.2.2. Extração dos limites da BHRP e da rede de drenagem

A extração dos limites da BHRP e de sua rede de drenagem foi realizada por meio do IPH-Hydro Tools, conjunto de ferramentas hidrológicas desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e integrado ao ambiente QGIS. O sistema automatiza etapas do pré-processamento hidrológico, desde a preparação do MDE até a derivação da direção e da acumulação de fluxo, assegurando padronização e reprodutibilidade dos procedimentos adotados (JARDIM et al., 2015; SIQUEIRA et al., 2016).

Inicialmente, o MDE foi submetido à correção por meio do módulo *Fill Sinks* (r.fill.dir), com o objetivo de eliminar depressões espúrias e picos artificiais que poderiam interromper a continuidade do escoamento superficial. Essa operação é considerada fundamental em procedimentos hidrológicos, pois assegura que o relevo digital represente trajetórias potenciais de escoamento compatíveis com a morfologia real (Jardim et al., 2015).

Em seguida, foram gerados os modelos de direção de fluxo (*flow direction*) e de fluxo acumulado (*flow accumulation*) utilizando o método D8, que avalia oito direções possíveis em uma janela 3×3 e quantifica a contribuição das células adjacentes na convergência do escoamento. Esse procedimento permite identificar as porções da paisagem com maior tendência à concentração do fluxo superficial e constitui a base para a extração da rede de drenagem.

Com base no mapa de acumulação de fluxo, a rede de drenagem foi extraída a partir da definição de um limiar mínimo de contribuição de 400 células (aproximadamente 0,36 km²), valor definido a partir da análise exploratória do padrão de drenagem e da escala de trabalho adotada. Posteriormente, procedeu-se à delimitação da bacia hidrográfica a partir do exutório localizado no lago do Puraquequara. O algoritmo agrupa todas as células cuja direção de fluxo converge para esse ponto, gerando automaticamente o polígono correspondente à área de contribuição.

O polígono correspondente à área de contribuição foi exportado em formato vetorial (shapefile) e submetido à verificação por inspeção visual e sobreposição com ortoimagens PlanetScope (2023, resolução espacial de 3 m), permitindo a checagem da coerência morfológica e hidrológica do contorno delimitado antes de sua utilização nas análises subsequentes.

3.2.3. Perfil longitudinal e setorização geomorfológica

Com a BHRP e sua rede de drenagem previamente delimitadas, procedeu-se à caracterização morfométrica do rio Puraquequara por meio da elaboração do perfil longitudinal do canal principal. Essa etapa teve como objetivo estruturar a base geomorfológica necessária à distinção entre setores do curso fluvial (alto, médio e baixo curso) e à organização espacial das análises posteriores.

O perfil longitudinal foi gerado em ambiente SIG a partir do eixo do canal principal extraído do MDE, relacionando a altitude do leito ao comprimento total do curso d'água entre as nascentes e o exutório no lago do Puraquequara. A partir do perfil longitudinal, foram identificados trechos com maior e menor declividade, bem como zonas de transição morfológica ao longo do curso fluvial.

Complementarmente, foram elaborados mapas de declividade e hipsometria da BHRP a partir do mesmo MDE, classificados em intervalos representativos das principais faixas altimétricas e dos gradientes suaves, moderados e mais acentuados do relevo. O mapa de declividade foi calculado em porcentagem e reclassificado conforme a proposta da EMBRAPA (2017). O mapa hipsométrico foi gerado com intervalos regulares que permitem distinguir áreas de cabeceira, setores intermediários e áreas rebaixadas próximas ao exutório. Esses produtos foram integrados ao traçado do rio principal, permitindo a identificação espacial de setores associados a maiores gradientes, áreas intermediárias de transição e trechos mais aplainados.

A setorização do rio em alto, médio e baixo curso foi realizada a partir da integração entre o comportamento do perfil longitudinal, a distribuição das declividades e as faixas hipsométricas, seguindo critérios clássicos de compartimentação longitudinal propostos por Christofletti (1980). Considerou-se como alto curso o segmento com maiores altitudes e declividades, caracterizado por maior energia de escoamento e potencial erosivo. O médio curso correspondeu às áreas de gradientes intermediários, onde predominam processos de transporte. Já o baixo curso englobou os trechos de menor declividade e altitudes mais baixas, marcados pela ampliação das planícies de inundação e pelo predomínio de deposição.

A compartimentação proposta foi avaliada em trabalho de campo, com visitas a pontos representativos de cada setor para observação de formas de canal, largura e profundidade do leito, granulometria dos sedimentos e evidências de erosão, transporte e deposição, bem como de feições associadas à dinâmica sazonal de cheias. As observações empíricas foram

confrontadas com os produtos de geoprocessamento, permitindo ajustes pontuais nos limites entre os setores e garantindo maior aderência entre o modelo teórico de alto–médio–baixo curso e os processos fluviais efetivamente observados na BHRP. Essa compartimentação constitui um referencial espacial para a localização dos pontos amostrais e para a análise das variações das propriedades físicas dos solos ao longo da bacia.

3.3. PROCEDIMENTOS PARA CARACTERIZAR A VARIABILIDADE ESPACIAL DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DOS SOLOS NAS UNIDADES DE PAISAGEM DA BHRP

A caracterização da variabilidade espacial das propriedades físicas dos solos na BHRP foi operacionalizada por meio de um conjunto articulado de procedimentos metodológicos, estruturados para captar diferenças laterais (entre margens direita e esquerda) e topográficas (entre posições de vertente e setores longitudinais) ao longo da bacia. A abordagem adotada buscou integrar a posição geomorfológica, a organização espacial do relevo e a distribuição dos pontos amostrais, de modo a permitir a comparação sistemática entre solos desenvolvidos sob distintas condições físicas e de uso da terra

3.3.1. Desenho amostral e critérios de seleção dos pontos

A seleção dos pontos amostrais foi orientada pelo objetivo de caracterizar a variabilidade espacial das propriedades físicas dos solos ao longo da BHRP, considerando tanto a diferenciação lateral entre as margens direita e esquerda quanto a organização longitudinal e transversal do relevo. Para isso, adotou-se um desenho amostral baseado em posições geomorfológicas contrastantes ao longo do sistema vertente, permitindo a comparação entre solos submetidos a diferentes condições topográficas, hidrológicas e de uso da terra.

Os pontos foram distribuídos de modo a contemplar:

- **Diferenciação longitudinal:** pontos localizados no baixo curso, conforme a compartimentação do rio Puraquequara;
- **Diferenciação lateral:** pontos distribuídos nas margens direita e esquerda, considerando diferenças de pressão de uso e cobertura vegetal;

- **Diferenciação topográfica:** pontos situados em posições contrastantes de vertente (baixo, encosta e platô), de modo a captar variações associadas ao gradiente topográfico e à dinâmica de erosão e deposição.

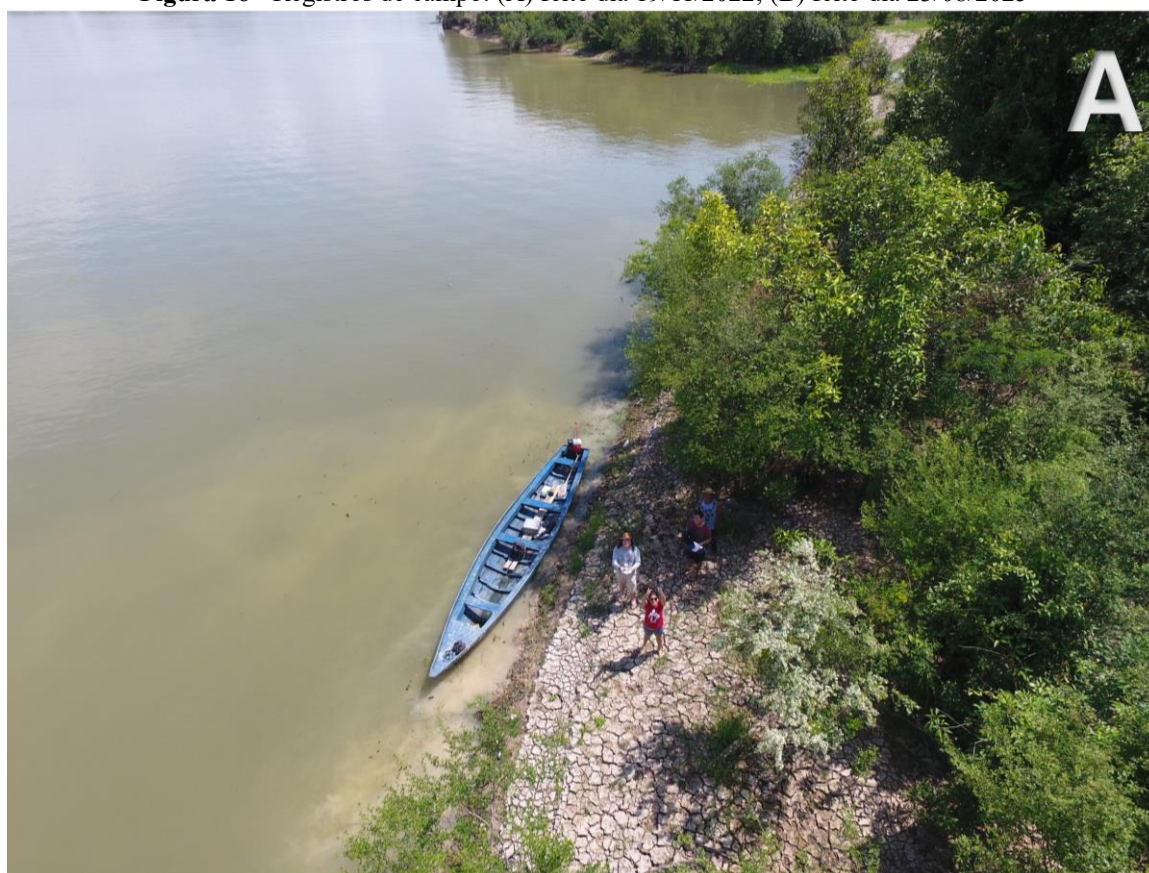
Essa estratégia amostral permitiu estruturar um desenho metodológico consistente para a análise da variabilidade das propriedades físicas dos solos, fornecendo suporte empírico às interpretações desenvolvidas ao longo do capítulo de resultados.

3.3.2. Coleta de amostras e ensaios de campo

A investigação de campo na BHRP foi realizada em múltiplas etapas, totalizando aproximadamente dez incursões à área de estudo. Contudo, parte dessas atividades foi condicionada por limitações operacionais, financeiras e de segurança, que afetaram o cronograma e a execução integral das campanhas. Entre os principais entraves estiveram a violência em determinados setores da bacia, as dificuldades de acesso terrestre e fluvial, a indisponibilidade de barqueiros em certos períodos do ano e os custos associados à realização reiterada dos trabalhos de campo. Em áreas amazônicas, o deslocamento por via fluvial frequentemente constitui componente logístico indispensável e financeiramente oneroso; além disso, em períodos de seca, a redução da navegabilidade e o aumento dos riscos associados ao percurso faziam com que nem sempre os barqueiros aceitassem realizar o transporte. Também houve restrições diretamente relacionadas à segurança em campo. Durante uma das atividades de coleta de solos, por exemplo, a equipe foi abordada por agentes policiais, que alertaram para as condições locais de insegurança e recomendaram que a permanência no setor fosse a mais breve possível. Em razão desse conjunto de fatores, nem todas as incursões resultaram em observações sistemáticas, registros ou coleta de dados.

Para fins metodológicos, foram considerados campos efetivos aqueles em que as atividades planejadas puderam ser realizadas de maneira satisfatória. Nessa condição, destacam-se as campanhas realizadas em 19/11/2022, 11/11/2023, 03/03/2025, 18/05/2025, 11/06/2025 e 23/08/2025 (*Figura 16*). Essas etapas constituíram a base empírica principal da pesquisa, permitindo a caracterização das unidades de paisagem e a interpretação de seus diferentes níveis de sensibilidade.

Figura 16 - Registros de campo: (A) feito dia 19/11/2022; (B) feito dia 23/08/2025



Fotos: DJI Phantom 4 Pro. **Piloto:** Antonio Fábio Sabbá Guimarães Vieira

Nas áreas definidas com base nas unidades de paisagem e nos critérios de seleção descritos anteriormente, foram realizados os seguintes procedimentos de campo:

Tradagem e coleta de amostras: foram realizadas tradagens com trado holandês para coleta de amostras de solo destinadas à análise granulométrica em laboratório. As amostras foram coletadas em profundidades padronizadas, acondicionadas em sacos plásticos identificados e transportadas ao laboratório para processamento posterior.

Teste de infiltração: em cada ponto de coleta de amostras, foram realizados testes de infiltração utilizando o infiltrômetro de Hills, com o objetivo de avaliar a capacidade de penetração da água no solo em condições naturais e em áreas densamente antropizadas. As taxas de infiltração foram registradas ao longo do tempo e expressas em milímetros por minuto (mm/min). Para a elaboração do gráfico da taxa de infiltração, os cálculos foram baseados na relação entre a taxa de infiltração instantânea e o total infiltrado (infiltração acumulada), conforme descrito por Reichardt (1990), expresso pela equação:

$$F = \int f dt \text{ (eq. 1)}$$

onde F representa o total infiltrado (infiltração acumulada); f , a taxa de infiltração instantânea; e t , o tempo.

Teste de resistência à penetração: na mesma área da coleta de amostras, também foram feitos três testes de penetração utilizando o penetrômetro de impacto, com o objetivo de avaliar a resistência do solo e gerar o gráfico do grau de compactação. O penetrômetro de impacto foi utilizado conforme protocolo padronizado, registrando-se a resistência à penetração em megapascals (MPa) ao longo do perfil.

Todos os procedimentos de campo seguiram as orientações metodológicas da Embrapa (2017), assegurando padronização e reprodutibilidade das medições.

3.3.3. Tratamento e análises laboratoriais

Após a etapa de coleta em campo, as 60 amostras de solo provenientes da BHRP foram encaminhadas ao Laboratório de Análise e Tratamento de Sedimentos e Solos, vinculado ao Departamento de Geografia da Universidade Federal do Amazonas (UFAM), para procedimentos de preparação e análise física (*Figura 17*). O tratamento das amostras seguiu o protocolo

metodológico operacional estabelecido pela Embrapa (2017), que compreende as etapas de secagem ao ar, destorroamento manual e peneiramento em malha de 2 mm, com o objetivo de separar a terra fina seca ao ar (TFSA) e quantificar a distribuição granulométrica das partículas.

Figura 17 - Tratamento das imagens em laboratório



Fotos: Gabriela Mendonça da Silva (2025)

Para a determinação da fração textural, adotou-se o método da pipetagem, conforme as recomendações da Embrapa (2017). O método consiste na dispersão física e química das partículas de solo, seguida da quantificação das frações areia, silte e argila por decantação e pipetagem em tempos determinados, de acordo com a Lei de Stokes. Os resultados foram expressos em percentuais de cada fração granulométrica e utilizados para a classificação textural das amostras.

3.4. PROCEDIMENTOS PARA AVALIAR A INTENSIDADE E A DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS INTERVENÇÕES HUMANAS

A avaliação da intensidade e da distribuição espacial das intervenções humanas na BHRP foi realizada por meio do mapeamento multitemporal do uso e cobertura da terra, com o objetivo de identificar mudanças expressivas na paisagem, quantificar sua extensão e intensidade e analisar sua distribuição espacial entre diferentes classes de cobertura ao longo do tempo. Essa abordagem permitiu reconhecer padrões de transformação da paisagem e relacioná-los com as unidades geomorfológicas e os setores da bacia.

3.4.1. Base de dados e imagem

Foram utilizadas imagens dos satélites Landsat 5 TM (Thematic Mapper) e Landsat 8 OLI (Operational Land Imager), correspondentes aos anos de 1984 e 2024, respectivamente. A escolha desses anos permitiu abranger um intervalo temporal de quatro décadas, período suficientemente longo para captar mudanças estruturais na organização da paisagem da BHRP. A seleção das imagens seguiu critérios de qualidade radiométrica e ausência de cobertura de nuvens, priorizando cenas com 100% de pixels livres de nuvens sobre a área de estudo.

As imagens foram adquiridas gratuitamente no catálogo do United States Geological Survey (USGS) por meio da plataforma Earth Explorer, com posterior recorte para a área de estudo utilizando o limite vetorial da BHRP previamente delimitado.

3.4.2. Pré-processamento e classificação do uso e cobertura da terra

O pré-processamento das imagens incluiu correção atmosférica, conversão de níveis digitais para reflectância de superfície e reprojeção para o Sistema de Coordenadas Universal Transversa de Mercator (UTM), Datum SIRGAS 2000, zona 21S. Essas etapas foram realizadas em ambiente Google Earth Engine (GEE) e QGIS, assegurando padronização entre os diferentes anos analisados.

A classificação do uso e cobertura da terra foi realizada pelo método de classificação supervisionada, utilizando o algoritmo *Random Forest* (Floresta Aleatória), que apresenta robustez para lidar com variabilidade espectral e reduzir erros de classificação em áreas heterogêneas. Foram definidas três classes temáticas principais:

- **Vegetação:** áreas com cobertura vegetal densa (floresta primária e secundária);
- **Atividade humana:** áreas antropizadas, incluindo uso urbano, estradas, ramais, clareiras e áreas com diferentes graus de intervenção;
- **Água:** corpos d'água (rios, lagos e igarapés).

Para o treinamento do classificador, foram selecionadas amostras de treinamento distribuídas espacialmente pela bacia, com apoio de ortoimagens de alta resolução (PlanetScope, 2023) e de conhecimento prévio adquirido em trabalhos de campo. A acurácia da classificação foi avaliada por meio da matriz de confusão e do índice Kappa, assegurando confiabilidade dos mapas produzidos.

3.4.3. Produtos cartográficos e métricas espaciais

A partir dos mapas de uso e cobertura da terra de 1984 e 2024, foram elaborados os seguintes produtos:

- **Mapas temáticos** por ano, representando a distribuição espacial das classes de uso e cobertura;
- **Mapa de mudanças**, destacando áreas que sofreram transição entre classes (ex.: vegetação → atividade humana);
- **Gráficos de pizza** apresentando os percentuais de cada classe nos dois anos analisados;

- **Análise por margem e setor** (alto, médio e baixo curso), permitindo identificar padrões espaciais de transformação e áreas de maior pressão antrópica.

Esses produtos permitiram quantificar a intensidade das intervenções humanas e interpretar sua relação com a organização geomorfológica da bacia, subsidiando a análise da sensibilidade da paisagem.

3.5.PROCEDIMENTOS PARA INTERPRETAR A CONFIGURAÇÃO ESPACIAL DAS ÁREAS ASSOCIADAS A DIFERENTES NÍVEIS DE SENSIBILIDADE

A elaboração dos mapas de sensibilidade da paisagem da BHRP fundamenta-se no conceito de Brunsden e Thornes (1979), que definem sensibilidade como a probabilidade de resposta da paisagem diante de uma perturbação externa. A metodologia adotada concentrou-se nos controles estruturais e funcionais permanentes da paisagem, sem a incorporação de informações pluviométricas, uma vez que se assume que o gatilho climático atua de forma relativamente homogênea na escala da bacia.

3.5.1. Base de dados e variáveis geomorfológicas

A base de dados utilizada foi composta pelo FABDEM e pelas imagens de uso e cobertura da terra de 2024. As imagens do FABDEM foram previamente corrigidas por meio do preenchimento de depressões espúrias (*Fill Sinks*), do cálculo da direção de fluxo (*Flow Direction*) e da acumulação de fluxo (*Flow Accumulation*). Todas as variáveis foram padronizadas em formato raster com resolução espacial de 30 m e projeção UTM SIRGAS 2000, zona 21S.

A estrutura metodológica foi organizada em três blocos de variáveis, representando diferentes dimensões do controle geomorfológico:

- **Bloco A – Controles morfológicos:** estrutura morfológica básica das encostas (declividade e curvatura de perfil);
- **Bloco B – Controles hidrológicos e de concentração de fluxos:** propensão à concentração do escoamento superficial (densidade de drenagem, área de contribuição, declividade e curvatura);

- **Bloco C – Conectividade geomorfológica:** capacidade de transmissão de água e sedimentos entre encostas e canais (densidade de caminhos de fluxo, acoplamento encosta–canal e continuidade da drenagem).

Cada variável foi normalizada em três classes ordinais (baixa = 1, média = 2 e alta = 3), conforme critérios geomorfológicos e hidrológicos estabelecidos na literatura.

3.5.2. Controle morfológico

O Bloco A representa a estrutura morfológica básica das encostas, associada à forma e à inclinação do relevo. As variáveis incluídas foram:

Declividade: calculada em porcentagem a partir do FABDEM e reclassificada em três classes conforme a proposta da EMBRAPA (2017): baixa (0–8%), média (8–20%) e alta (>20%). A declividade expressa o gradiente topográfico e influencia diretamente a velocidade do escoamento superficial e o potencial erosivo.

Curvatura de perfil: calculada a partir do FABDEM e classificada em convexa (valores positivos), planar (valores próximos de zero) e côncava (valores negativos). A curvatura de perfil indica a forma da vertente em seção longitudinal e condiciona processos de aceleração ou desaceleração do fluxo ao longo da encosta. Vertentes convexas tendem a acelerar o escoamento, enquanto vertentes côncavas favorecem a concentração de fluxos.

A integração do Bloco A resultou da média aritmética entre declividade e curvatura de perfil, gerando um raster que expressa a **sensibilidade morfológica local** das encostas.

3.5.3. Bloco B – Controle hidrológico e concentração de fluxos

O Bloco B representa a propensão do relevo à concentração e organização do escoamento superficial. As variáveis incluídas foram:

Densidade de drenagem: obtida a partir do *Flow Accumulation*, convertida em vetor (rede de drenagem) e calculada pela ferramenta *Line Density* do QGIS, que gera um raster de densidade de linhas por unidade de área (km/km²). A densidade foi reclassificada em três classes

pelo método de quebras naturais (Jenks): baixa, média e alta. Maior densidade de drenagem indica maior capacidade de canalização e transferência rápida de fluxos.

Área de contribuição: derivada diretamente do *Flow Accumulation*, convertida para área real (km²) e reclassificada em três classes. Áreas de maior contribuição indicam maior volume de água potencialmente acumulado a montante, aumentando a capacidade erosiva do fluxo.

Declividade e curvatura de perfil: incorporadas novamente ao Bloco B, considerando seu papel na intensificação do escoamento concentrado (mesma reclassificação do Bloco A).

A integração do Bloco B foi obtida pela média aritmética entre densidade de drenagem, área de contribuição, declividade e curvatura de perfil, expressando a **sensibilidade associada à concentração hidrológica** e à transferência de fluxos.

3.5.4. Bloco C – Conectividade geomorfológica

O Bloco C representa a capacidade do sistema em transmitir água e sedimentos entre encostas e canais, sendo o principal componente funcional do modelo. As variáveis incluídas foram:

Densidade de caminhos de fluxo: extraída do *Flow Accumulation* com limiar inferior ao da rede de drenagem formal, convertida em vetor e processada pela ferramenta *Line Density*, sendo reclassificada em três classes. Essa variável representa a malha de trajetórias potenciais de escoamento superficial difuso, anterior à canalização.

Acoplamento encosta–canal: calculado pela distância euclidiana até a rede de drenagem, com reclassificação invertida: menor distância corresponde a maior acoplamento (classe 3), enquanto maior distância corresponde a menor acoplamento (classe 1). Essa variável expressa a proximidade funcional entre as encostas e os canais, condicionando a eficiência da transferência de sedimentos.

Continuidade da drenagem: representada pela densidade de drenagem como *proxy*, reclassificada conceitualmente em baixa e alta continuidade. Maior continuidade indica maior capacidade de transmissão longitudinal de água e sedimentos ao longo da rede.

A integração do Bloco C foi obtida pela média aritmética entre as três variáveis, expressando a **conectividade funcional** do sistema geomorfológico.

3.5.5. Integração dos blocos e produção dos mapas finais

A construção dos mapas finais seguiu dois cenários:

Cenário 1 – Sensibilidade Funcional Natural: obtida pela média aritmética entre os três blocos (A, B e C), representando a sensibilidade inerente da paisagem, controlada exclusivamente por fatores geomorfológicos e hidrológicos. Esse mapa expressa a probabilidade relativa de resposta do sistema em condições naturais, sem considerar as modificações impostas pelo uso e ocupação da terra.

Cenário 2 – Sensibilidade Funcional Condicionada pelo Uso do Solo: incorporou o uso e ocupação do solo (obtido na seção 3.3) como fator modulador da conectividade geomorfológica. O mapa de uso do solo foi reclassificado em três classes de acordo com a capacidade de amortecimento:

- **Vegetação:** maior amortecimento (classe 1);
- **Atividade humana:** menor amortecimento (classe 3);
- **Água:** condição intermediária (classe 2).

A integração foi obtida pela média entre os três blocos geomorfológicos e o mapa de uso reclassificado, resultando na expressão da **sensibilidade sob as condições atuais de uso** da BHRP.

A incorporação do uso e ocupação da terra foi considerada necessária porque esses elementos funcionam como moduladores diretos da conectividade geomorfológica: áreas com cobertura vegetal densa tendem a aumentar a rugosidade superficial, reduzir a velocidade do escoamento e ampliar a capacidade de retenção de sedimentos, enquanto áreas antropizadas tendem a reduzir o amortecimento e favorecer respostas mais rápidas e intensas.

3.5.6. Validação e checagem dos produtos

Os mapas finais foram submetidos a validação por meio de:

- **Inspeção visual** e sobreposição com ortoimagens de alta resolução (PlanetScope, 2023);
- **Checagem em campo**, com visitas a áreas representativas de diferentes níveis de sensibilidade para verificação da coerência entre os padrões mapeados e as evidências morfológicas observadas (feições erosivas, acúmulo de sedimentos, áreas de maior ou menor estabilidade);
- **Análise de coerência espacial**, verificando se as áreas classificadas como de alta sensibilidade correspondem a setores com evidências de processos erosivos ativos, conforme registros de campo e mapeamento de voçorocas.

Diferentemente de mapas de risco ou vulnerabilidade, os produtos gerados representam probabilidades relativas de resposta geomorfológica, considerando tanto os controles estruturais do relevo quanto os aspectos funcionais de conectividade, traduzindo a sensibilidade não apenas como uma condição natural, mas como um estado funcional condicionado pelas intervenções humanas, tornando os resultados mais representativos da realidade atual da BHRP.

RESULTADOS

O caminho da tua tese passa por definir as unidades de paisagem da bacia do Puraquequara, porque só assim transformarás a complexidade geomorfológica da bacia em conhecimento útil para sua conservação e gestão.

Colaboração do prof. Dr. Osvaldo Girão da Silva na banca de qualificação, ago./2023.

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os capítulos anteriores constituíram as bases teóricas, a caracterização da área de estudo e os procedimentos metodológicos. Este, entretanto, concentra o momento em que essas dimensões se encontram na análise empírica. É aqui que os dados produzidos em campo e em laboratório deixam de figurar como registros isolados e passam a ser interpretados como sinais do funcionamento (e também dos limites) das Unidades de Paisagem da BHRP.

A discussão desenvolvida estrutura-se a partir dos três objetivos específicos da pesquisa, articulados de forma progressiva. Em um primeiro momento, são examinadas as propriedades físicas dos solos, com destaque para a variabilidade espacial da granulometria, da infiltração e da resistência à penetração, atendendo ao primeiro objetivo específico. Esses atributos são interpretados como indicadores da integridade funcional do sistema solo–paisagem, permitindo reconhecer contrastes estruturais, identificar limiares de resposta e distinguir diferentes estados de sensibilidade entre as unidades analisadas.

Em seguida, os resultados são interpretados à luz da intensidade e da espacialização das intervenções humanas, cumprindo o segundo objetivo específico. Mesmo quando não expressas apenas por métricas diretas de uso da terra, essas intervenções se mostram de forma inequívoca na reorganização física dos solos, condicionando sua resposta hidrológica e mecânica. Dessa maneira, a análise evidencia como trajetórias distintas de uso produzem padrões igualmente distintos de degradação, adaptação ou colapso funcional das unidades de paisagem.

Por último, a discussão incorpora a sazonalidade fluvial como elemento estruturante da sensibilidade da paisagem, respondendo ao terceiro objetivo específico. O regime hidrológico sazonal é tratado como um estresse recorrente, capaz de testar periodicamente a estabilidade das unidades e de amplificar diferenças previamente estabelecidas pela resistência dos solos e pela ação humana. De forma análoga ao funcionamento de um organismo, a paisagem da BHRP é analisada aqui como um sistema no qual diferentes "tecidos" respondem de maneira desigual aos mesmos estímulos. Algumas unidades mantêm capacidade de adaptação e reorganização, enquanto outras operam próximas ou além de seus limiares funcionais, reagindo de forma desmedida a estresses relativamente comuns. Essa leitura integrada reforça que a sensibilidade da paisagem não é atributo fixo, mas condição dinâmica, que pode se intensificar, estabilizar ou migrar entre unidades ao longo do tempo.

4.1. CARACTERIZAÇÃO DA VARIABILIDADE ESPACIAL DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO

A análise da variabilidade espacial das propriedades físicas dos solos na BHRP adotou uma concepção integrada de ambiente, que entende a paisagem como resultado das interações entre processos geobiofísicos e atividades humanas. Portanto, os solos não são tratados como elementos isolados, mas como componentes de um metabolismo paisagístico onde convergem a formação pedogenética, a dinâmica geomorfológica e as transformações associadas ao uso atual da terra.

A disposição espacial da bacia revela dois domínios contrastantes, com regimes distintos de funcionamento. A margem esquerda, coberta por floresta contínua, insere-se em um contexto com mínimas pressões e maior continuidade dos processos pedogenéticos. A margem direita, por sua vez, marcada por ocupação residencial, atividades agrícolas e amplas áreas de solo exposto, expressa um cenário de reconfiguração paisagística em que as ações humanas passam a influenciar decisivamente a dinâmica pedológica e hidrológica. Mais do que simples unidades, essas margens representam modos diferentes de funcionamento do sistema solo – paisagem.

Essa diferenciação espacial orienta o gradiente de sensibilidade analisado neste trabalho. Em geral, solos sob cobertura florestal tendem a resistir melhor à erosão, apresentam agregados mais estáveis, estrutura mais desenvolvida e maior macroporosidade, enquanto solos sujeitos a usos intensivos perdem progressivamente propriedades físicas protetoras, aumentando sua vulnerabilidade ao escoamento superficial e à mobilização de sedimentos. Como em sistemas biológicos, alguns trechos da paisagem absorvem perturbações sem afetar o funcionamento geral, enquanto outros, já fragilizados, reagem de forma rápida e desproporcional a estímulos relativamente modestos.

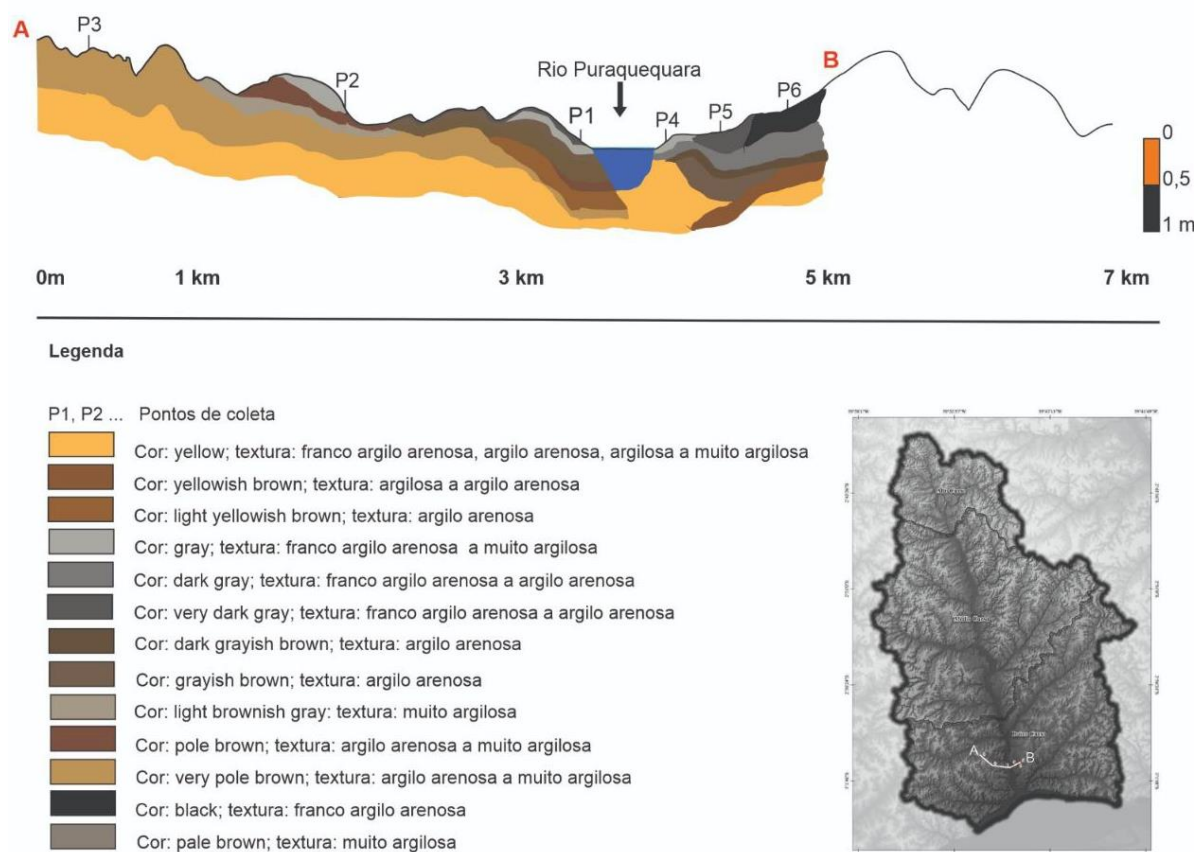
Nesta seção, o solo é tomado como eixo central para a leitura da paisagem, o que permite definir unidades de paisagem com base pedológica e funcional. Tais unidades foram analisadas a partir da variabilidade granulométrica, da densidade e porosidade, da dinâmica de infiltração e da resistência à penetração, em atendimento ao primeiro objetivo específico deste trabalho. A abordagem procura compreender como diferentes estados estruturais do solo materializam gradientes de sensibilidade, sem pretender esgotar a complexidade da BHRP. As interpretações que

seguem servirão de base para uma síntese final, na qual as unidades de paisagem serão integradas e discutidas de forma articulada.

4.1.1. Caracterização geral dos solos da bacia

A **Figura 18** apresenta o perfil esquemático do transecto A–B e a localização dos pontos de amostragem (P1–P6). Os resultados a seguir estão organizados por unidade geomorfológica (baixio, encosta, platô) e por margem (direita e esquerda) para facilitar a comparação espacial das características físicas do solo (granulometria, densidade do solo, porosidade, infiltração e resistência à penetração). Essa organização parte da ideia de que um dos primeiros atributos que caracterizam um horizonte do solo é o tamanho das partículas que o compõem, o que justifica iniciar a leitura da variabilidade espacial pela granulometria e pelas classes texturais.

Figura 18 - Perfil esquemático do transecto A–B e distribuição textural dos solos



Inicia-se a apresentação dos resultados com o item de classes texturais e granulometria, que sintetiza padrões laterais (margens) e verticais (profundidade) fundamentais para interpretar diferenças de resistência dos materiais e, por consequência, distintos patamares potenciais de sensibilidade geomorfológica.

4.1.1.1. Classes texturais e granulometria

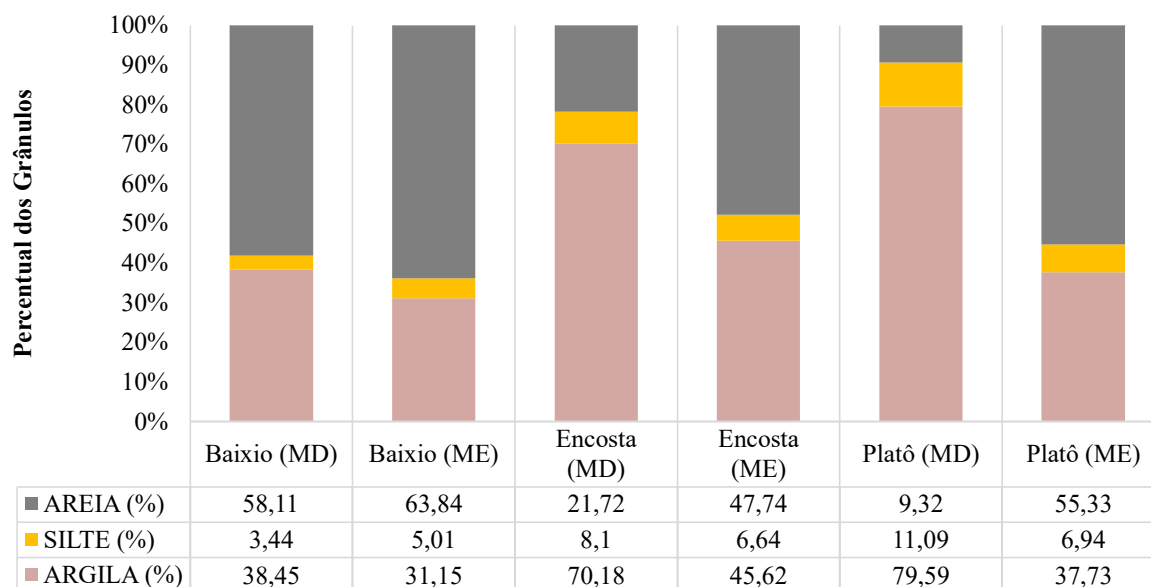
Os dados granulométricos (0–100 cm; n=10 camadas por unidade) evidenciam um contraste lateral muito marcado entre as margens da BHRP. Na margem direita, a fração argila domina na encosta e platô: no baixio, a argila média é 38,45% (areia 58,11%), enquanto na encosta a argila média sobe para 70,18% (areia 21,72%) e, no platô, atinge 79,59% (areia 9,32%) (**Tabela 1**). Esse padrão é coerente com a ideia de que a diferenciação inicial dos horizontes está no tamanho das partículas (Lepsch, 2011), aqui expressa por um gradiente lateral de aumento relativo de partículas finas nas unidades de maior energia morfodinâmica (encosta) e no topo (platô) da margem direita.

Tabela 1 - Síntese granulométrica média (0–100 cm) por unidade geomorfológica e margem

Unidade geomorfológica	Margem	N (camadas)	Argila média (%)	Silte média (%)	Areia média (%)	Argila mín. - máx. (%)
Baixio	Direita	10	38,45	3,44	58,11	23,55 – 50,85
	Esquerda	10	31,15	5,01	63,84	19,50 – 35,35
Encosta	Direita	10	70,18	8,1	21,72	64,02 – 74,05
	Esquerda	10	45,62	6,64	47,74	38,70 – 53,77
Platô	Direita	10	79,59	11,09	9,32	74,60 – 84,70
	Esquerda	10	37,73	6,94	55,33	28,40 – 44,57

Fonte: Análises laboratoriais. **Organização:** André Alves (2025).

Na margem esquerda, a granulometria é sistematicamente mais arenosa em todas as unidades, com areia média de 63,84% no baixio (argila 31,15%), 47,74% na encosta (argila 45,62%) e 55,33% no platô (argila 37,73%) (). Esses contrastes médios entre unidades e margens podem ser visualizados de forma sintética na **Figura 19**, que resume a composição percentual de argila, silte e areia por unidade geomorfológica. Comparando as margens, nota-se que a encosta esquerda é a unidade que mais se aproxima de um equilíbrio entre areia e argila, enquanto baixio e platô mantêm dominância arenosa. Essa diferença lateral reforça a ideia de que as unidades geomorfológicas não se distinguem somente por posição topográfica, mas por conjuntos texturais diferentes.

Figura 19 - Distribuição média das frações granulométricas por unidade geomorfológica e margem

Fonte: Análises laboratoriais. **Organização:** André Alves (2025)

Além do contraste lateral, os dados refletem organização vertical distinta entre margens. No baixio da margem direita (P1), a argila aumenta progressivamente em profundidade (mín.–máx.: 23,55–50,85%), sugerindo diferenciação vertical mais forte do que no baixio da margem esquerda (P4), onde a amplitude é menor (19,50–35,35%) e a dominância arenosa se mantém ao longo do perfil (**Tabela 1**). Em encosta e platô da margem direita, a argila permanece alta e relativamente homogênea em todo o perfil (encosta: 64,02–74,05%; platô: 74,60–84,70%), o que contrasta com a margem esquerda, onde encosta e platô exibem maior oscilação vertical e texturas intermediárias (encosta: 38,70–53,77%; platô: 28,40–44,57%) (**Tabela 1**).

A conversão dessas proporções em classes texturais consolida as diferenças: encosta e platô da margem direita enquadram-se de modo recorrente como muito argilosos, enquanto as unidades da esquerda concentram-se em classes intermediárias, com maior participação de areia (**Quadro 2**). A dominância de argila na margem direita significa maior presença relativa de partículas extremamente finas, reforçando o caráter físico dessas frações e sua implicação potencial na coesão e no comportamento hídrico do material.

Quadro 2 - Textura e cor dos perfis de solo por margem

Margem Direita	Amostras	Prof (cm)	Textura	Cor	Margem esquerda	Amostras	Prof (cm)	Textura	Cor
	1.1	0 - 10	Franco argilo arenoso	10YR 3/1		4.1	0 - 10	Franco argilo arenoso	2.5Y 5/1
	1.2	10 - 20	Franco argilo arenoso	10YR 5/1		4.2	10 - 20	Franco argilo arenoso	2.5Y 4/1
	1.3	20 - 30	Argilo arenoso	10YR 5/2		4.3	20 - 30	Franco argilo arenoso	2.5Y 7/6
	1.4	30 - 40	Franco argilo arenoso	10YR 6/2		4.4	30 - 40	Franco argilo arenoso	2.5Y 7/6
	1.5	40 - 50	Argilo arenoso	10YR 6/2		4.5	40 - 50	Franco argilo arenoso	2.5Y 8/6
	1.6	50 - 60	Argilo arenoso	10YR 6/3		4.6	50 - 60	Franco argilo arenoso	2.5Y 8/6
	1.7	60 - 70	Argilo arenoso	10YR 6/4		4.7	60 - 70	Franco argilo arenoso	2.5Y 7/6
	1.8	70 - 80	Argilo arenoso	10YR 6/4		4.8	70 - 80	Franco argilo arenoso	2.5Y 8/6
	1.9	80 -90	Argilo arenoso	10YR 7/4		4.9	80 -90	Franco argilo arenoso	2.5Y 7/6
	1.10	90 -100	Argilo arenoso	10YR 7/8		4.10	90 -100	Franco argilo arenoso	2.5Y 8/6
	2.1	0 - 10	Muito argiloso	10YR 7/2		5.1	0 - 10	Argilo arenoso	10YR 3/1
	2.2	10 - 20	Muito argiloso	10YR 6/3		5.2	10 - 20	Argilo arenoso	10YR 3/1
	2.3	20 - 30	Muito argiloso	10YR 6/2		5.3	20 - 30	Argilo arenoso	10YR 4/1
	2.4	30 - 40	Muito argiloso	10YR 7/3		5.4	30 - 40	Argilo arenoso	10YR 4/1
	2.5	40 - 50	Muito argiloso	10YR 7/3		5.5	40 - 50	Argilo arenoso	10YR 4/2
	2.6	50 - 60	Muito argiloso	10YR 8/4		5.6	50 - 60	Argilo arenoso	10YR 5/2
	2.7	60 - 70	Muito argiloso	10YR 7/8		5.7	60 - 70	Argilo arenoso	10YR 5/2
	2.8	70 - 80	Muito argiloso	10YR 8/6		5.8	70 - 80	Argiloso	10YR 7/8
	2.9	80 -90	Muito argiloso	10YR 8/6		5.9	80 -90	Argiloso	10YR 5/4
	2.10	90 -100	Muito argiloso	10YR 7/8		5.10	90 -100	Argilo arenoso	10YR 5/4
	3.1	0 - 10	Muito argiloso	10YR 7/3		6.1	0 - 10	Franco argilo arenoso	10YR 2/1
	3.2	10 - 20	Muito argiloso	10YR 7/4		6.2	10 - 20	Franco argilo arenoso	10YR 2/1
	3.3	20 - 30	Muito argiloso	10YR 7/3		6.3	20 - 30	Argilo arenoso	10YR 4/1
	3.4	30 - 40	Muito argiloso	10YR 7/3		6.4	30 - 40	Argilo arenoso	10YR 4/1
	3.5	40 - 50	Muito argiloso	10YR 7/3		6.5	40 - 50	Argilo arenoso	10YR 4/1
	3.6	50 - 60	Muito argiloso	10YR 8/6		6.6	50 - 60	Argilo arenoso	10YR 5/2
	3.7	60 - 70	Muito argiloso	10YR 8/6		6.7	60 - 70	Argilo arenoso	10YR 5/6
	3.8	70 - 80	Muito argiloso	10YR 8/6		6.8	70 - 80	Argilo arenoso	10YR 5/6
	3.9	80 -90	Muito argiloso	10YR 8/6		6.9	80 -90	Argiloso	10YR 7/8
	3.10	90 -100	Muito argiloso	10YR 8/6		6.10	90 -100	Argilo arenoso	10YR 7/8

Fonte: Análises laboratoriais. **Organização:** André Alves (2025).

Na margem direita, verifica-se o predomínio de solos de textura muito argilosa e argilo-arenosa, sobretudo a partir das camadas subsuperficiais, distintos por relativa homogeneidade textural ao longo do perfil vertical (Quadro X). As cores notadas concentram-se especialmente no matiz 10YR, indicando solos mais oxidados e bem desenvolvidos, associados a condições de drenagem relativamente estáveis, como ocorre nos Latossolos. Em contraposição, a margem esquerda apresenta maior variabilidade textural, com predominância de solos franco-argilo-arenosos e argilo-arenosos ao longo do perfil, sugerindo maior equilíbrio entre as frações areia, silte e argila. As cores registradas incluem, além do matiz 10YR, a presença expressiva do matiz 2.5Y, com valores altos e cromas variáveis, provando a influência de maior umidade, atributo da margem por se encontrar em área de floresta preservada.

Funcionalmente, os contrastes granulométricos observados constituem condicionantes diretos para a dinâmica hídrica e, por consequência, para a sensibilidade geomorfológica. Nos setores mais argilosos (encosta e platô da margem direita), a maior proporção de finos tende a ampliar a retenção de água no solo (Lepsch, 2011). Já nos setores mais arenosos da margem esquerda (especialmente baixio e platô), a maior participação de areia indica outra organização do sistema poroso e menor capacidade relativa de retenção, o que exige tratar a resistência e a resposta hidrológica como resultados da combinação entre textura e estrutura, e não como efeito automático de “solo natural” versus “solo urbano”.

Finalmente, ao articular textura e circulação de água, a interpretação deve ser cautelosa: maior teor de argila não implica, por si, maior infiltração, porque a água pode circular mais lentamente quando depende de poros finos (Lepsch, 2011). A margem direita reúne unidades com altíssima argila (encosta e platô) que podem, dependendo do estado estrutural, favorecer retenção e redução de percolação; enquanto a esquerda, mais arenosa, tende a expressar outra dinâmica, com maior predominância de macroporos entre grãos, mas com menor retenção. Em síntese, os contrastes laterais (margens) e verticais (profundidade) da granulometria constituem a base física para discutir diferenças de resistência dos materiais e, logo, diferentes condições potenciais de sensibilidade geomorfológica na bacia do rio Puraquequara.

4.1.1.2. Densidade do solo e porosidade

A densidade do solo (D_s) e a porosidade total (PT) constituem atributos físicos básicos para compreender a resistência mecânica dos materiais e o comportamento hidrológico das

Unidades de Paisagem da BHRP. A densidade do solo representa a relação entre a massa de solo seco e o volume total que ocupa, considerando tanto a fase sólida quanto os espaços vazios. Já a porosidade total expressa a proporção do volume do solo ocupada por fluidos, correspondendo aos espaços disponíveis entre e dentro dos agregados para circulação de ar e água. Esses dois parâmetros estão diretamente relacionados, sendo a porosidade função da razão entre a densidade do solo e a densidade de partículas (Lepsch, 2011).

Os dados mostram contrastes claros de D_s e PT entre unidades geomorfológicas e entre margens. Na margem direita, nota-se um gradiente sistemático ao longo da topossequência: no baixio direito, a densidade do solo varia entre 1,34 e 1,44 g cm⁻³, com PT associada entre 43,03% e 47,93%; nas encostas, a D_s diminui para 1,18–1,24 g cm⁻³, enquanto a PT aumenta para 52,25–54,51%; e, no platô da margem direita, registram-se os menores valores de D_s (1,09–1,15 g cm⁻³) e PT frequentemente acima de 55% (53,39–59,24%). Esse comportamento é coerente com a indicação de que a densidade do solo “não é fixa” dentro de um mesmo material, porque “a densidade do solo pode variar em um mesmo horizonte (...) porque depende da sua estrutura e da compactação” (Lepsch, 2011, p. 227), o que reforça a análise de que diferenças espaciais de D_s/PT refletem variações de arranjo estrutural ao longo da vertente.

Esse padrão indica que, na margem direita, os solos tornam-se progressivamente menos densos e mais porosos do baixio para o topo do relevo. Para qualificar essa leitura, é importante destacar que um horizonte mineral do solo com boa porosidade terá cerca de 50% de seu volume ocupado pelos poros (Lepsch, 2011). Assim, as encostas e platôs da margem direita (PT média ~53–56%) situam-se em patamar compatível com “boa porosidade” em termos de volume total de poros (**Tabela 2**), ainda que essa condição não informe, por si só, sobre conectividade hidráulica (macro/microporos), perspectiva que só pode ser discutida de modo completo ao integrar infiltração e resistência à penetração nas seções seguintes. (**Tabela 2**).

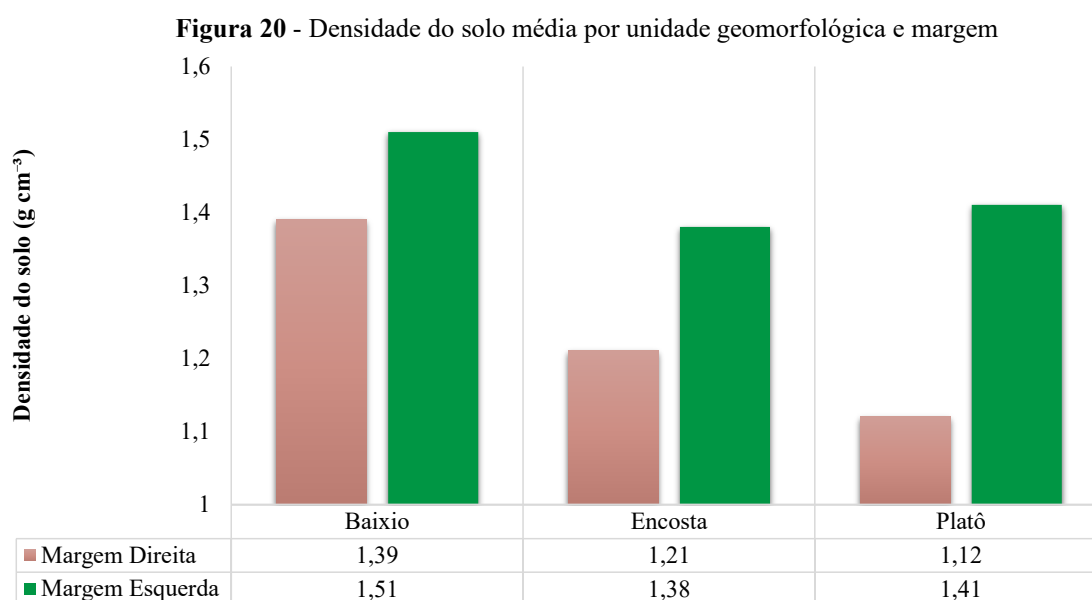
Tabela 2 - Densidade do solo (D_s) por unidade geomorfológica e margem

Margem	Unidade geomorfológica	N (camadas)	D_s média (g cm ⁻³)	D_s mín. - máx. (g cm ⁻³)	PT média (%)	PT mín. - máx. (%)
Direita	Baixio	10	1,39	1,34 – 1,44	45,66	43,03 – 47,93
	Encosta	10	1,21	1,18 – 1,24	53,34	52,25 – 54,51
	Platô	10	1,12	1,09 – 1,15	55,99	53,39 – 59,24
Esquerda	Baixio	10	1,51	1,42 – 1,58	42,16	38,49 – 45,48
	Encosta	10	1,38	1,34 – 1,42	46,04	43,74 – 47,92
	Platô	10	1,41	1,30 – 1,47	46,32	43,64 – 49,92

Nota: D_s = densidade do solo; PT = porosidade total.

Fonte: Análises laboratoriais. **Organização:** André Alves (2025)

Na margem esquerda, o desempenho é distinto. Os baixios mostram os maiores valores de D_s de toda a bacia ($1,42\text{--}1,58\text{ g cm}^{-3}$) e PT reduzida ($38,49\text{--}45,48\%$), o que os diferencia nitidamente das demais unidades (**Tabela 2**). Nas encostas da margem esquerda, a D_s situa-se em faixa intermediária ($1,34\text{--}1,42\text{ g cm}^{-3}$), e a PT varia entre $43,74\%$ e $47,92\%$ (**Tabela 2**). Nos platôs, apesar de ocorrerem camadas com D_s relativamente baixa (mínimo de $1,30\text{ g cm}^{-3}$), a unidade mantém D_s média mais elevada que o platô da margem direita ($1,41$ vs. $1,12\text{ g cm}^{-3}$) e Pt média inferior a 50% (**Tabela 2**). A **Figura 20**, por sua vez, deve ser tratada como síntese comparativa das D_s médias entre unidades e margens, enquanto os intervalos (mín.–máx.) e as PT associadas permanecem ancorados na estatística do **Tabela 2**.



Fonte: Análises laboratoriais. **Organização:** André Alves (2025)

A leitura conjunta de D_s e PT deve considerar que a porosidade total reúne poros de diferentes tamanhos, uma vez que o volume total de poros é o somatório de todos os tamanhos: grandes, médios e pequenos (Lepsch, 2011). Isso é decisivo para evitar interpretações baseadas apenas em PT média: uma PT elevada pode refletir grande quantidade de microporos (retenção), sem necessariamente implicar alta condutividade (macroporos conectados), e uma PT menor pode coexistir com macroporosidade funcional, dependendo do arranjo estrutural. Portanto, embora a urbanização seja frequentemente associada ao aumento de D_s por compactação, os resultados da BHRP mostram que as diferenças entre margens não podem ser reduzidas a uma implicação única: elas variam por unidade geomorfológica e expressam, sobretudo, estados

estruturais distintos, coerentes com a observação de Lepsch de que variações em D_s decorrem de “estrutura e compactação” (Lepsch, 2011).

Do ponto de vista ecológico e geomorfológico, esse contraste estrutural tem implicações diretas na sensibilidade da paisagem. Nos baixios compactos da margem esquerda (D_s alta e PT baixa), a energia das chuvas tende a encontrar um material com menor “estoque” de porosidade volumétrica disponível, favorecendo excedentes superficiais quando a precipitação supera a capacidade de entrada de água no solo, aspecto que será verificado empiricamente pelos ensaios de infiltração. Nas encostas e platôs da margem direita, por outro lado, a PT mais alta sugere maior potencial de armazenamento volumétrico; entretanto, a relevância geomorfológica dessa “vantagem” depende da qualidade e continuidade do espaço poroso (macro/micro), porque a degradação da organização dos agregados pode comprometer infiltração e circulação hídrica, já que a perda de organização estrutural prejudica porosidade, aeração, infiltração e circulação da água (Lepsch, 2011).

Portanto, as diferenças notadas de densidade do solo e porosidade total entre margens e unidades geomorfológicas constituem um componente central para compreender a resistência dos materiais e a sensibilidade potencial das unidades de paisagem na BHRP.

4.1.1.3. Densidade de partículas

O **Tabela 3** sintetiza os valores de densidade de partículas (D_p) por margem e unidade geomorfológica. A D_p funciona como um indicador da natureza do material sólido do solo, isto é, do tipo de mineral predominante que compõe os grãos, sendo útil para verificar se os contrastes notados em D_s e PT podem estar associados a mudanças mineralógicas ou se derivam principalmente do arranjo estrutural e do espaço poroso. Segundo Lepsch (2011), em horizontes minerais com elevados teores de óxidos de ferro a D_p costuma estar em torno de $3,0 \text{ g cm}^{-3}$, enquanto em solos minerais com baixos teores de óxidos de ferro os valores acontecem mais frequentemente em torno de $2,6 \text{ g cm}^{-3}$, próximos aos de minerais comuns como quartzo ($2,65 \text{ g cm}^{-3}$) e caulinita ($2,6 \text{ g cm}^{-3}$). Assim, D_p sistematicamente próxima de $3,0 \text{ g cm}^{-3}$ sugeriria maior participação relativa de materiais mais densos, ao passo que valores concentrados ao redor de $2,6 \text{ g cm}^{-3}$ indicariam predomínio de minerais comuns, sem deslocamento expressivo do indicador.

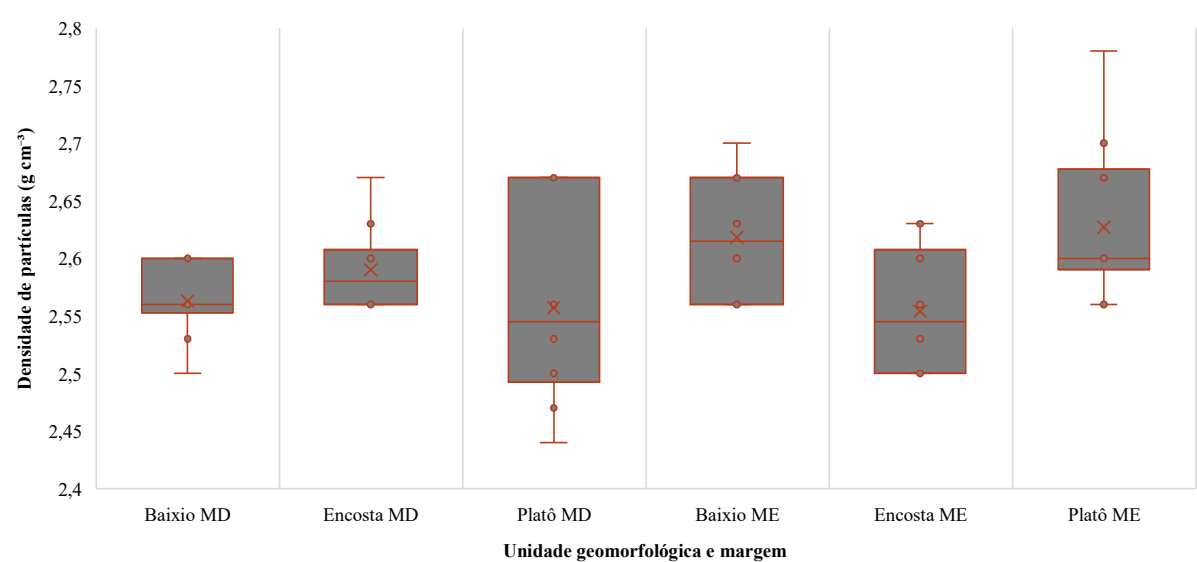
Tabela 3 - Densidade de partículas (D_p) por unidade geomorfológica e margem

Margem	Unidade geomorfológica	n (camadas)	D_p média (g cm^{-3})	Mediana (g cm^{-3})	DP (g cm^{-3})	$Q1-Q3$ (g cm^{-3})	Mín.-máx. (g cm^{-3})
Direita	Baixio	10	2,56	2,56	0,03	2,56–2,59	2,50–2,60
	Encosta	10	2,59	2,58	0,04	2,56–2,60	2,56–2,67
	Platô	10	2,56	2,54	0,09	2,50–2,64	2,44–2,67
Esquerda	Baixio	10	2,62	2,62	0,06	2,56–2,67	2,56–2,70
	Encosta	10	2,55	2,54	0,05	2,51–2,59	2,50–2,63
	Platô	10	2,63	2,60	0,07	2,60–2,65	2,56–2,78

Nota: $Q1-Q3$ = intervalo interquartílico (25%–75%), que compõe a “caixa” do boxplot; DP = desvio-padrão.
Fonte: Análises laboratoriais. **Organização:** André Alves (2025)

A **Figura 21** complementa essa leitura ao apresentar a distribuição da D_p e a dispersão interna entre os grupos, permitindo comparar tendência central e variabilidade. Ao analisar as categorias individualmente, observa-se que o baixio da margem direita apresenta a distribuição mais homogênea, ou seja, menor dispersão, enquanto o platô da mesma margem exibe maior variabilidade, sugerindo heterogeneidade interna mais alta nessa unidade. Na margem esquerda, o platô concentra as maiores tendências centrais (mediana/média) e alcança valores máximos próximos de $2,8 \text{ g cm}^{-3}$, ainda dentro do intervalo típico de solos minerais dominados por constituintes comuns.

Figura 21 - Distribuição da densidade de partículas (D_p) por unidade geomorfológica e margem



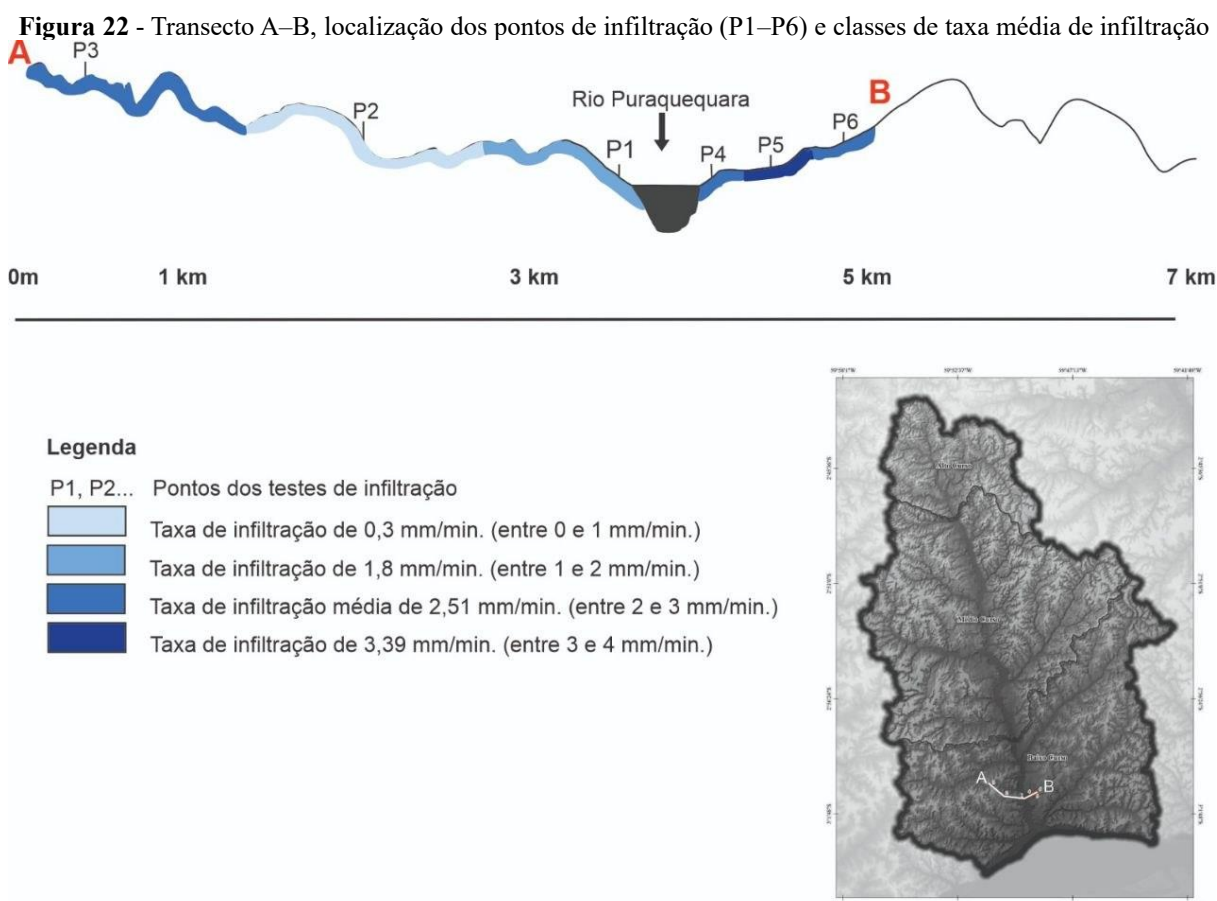
Fonte: Análises laboratoriais. **Organização:** André Alves (2025).

No conjunto da BHRP, os valores de D_p se concentram majoritariamente entre $\sim 2,5$ e $2,7 \text{ g cm}^{-3}$, sem padrão consistente de deslocamento para $\sim 3,0 \text{ g cm}^{-3}$. Portanto, os contrastes observados em densidade do solo (D_s) e porosidade total (PT) devem ser interpretados

sobretudo como resultado de diferenças no estado físico e no arranjo estrutural do solo, e não como evidência de um deslocamento mineralógico sistemático detectável via D_p .

4.1.2. Dinâmica hídrica

A **Figura 22** sintetiza a espacialização das taxas médias de infiltração (mm/min) ao longo do transecto A–B, permitindo comparar diretamente as unidades geomorfológicas e as margens. Observa-se que a menor média ocorre na encosta da margem direita (P2 = 0,3055 mm/min), enquanto a maior média se concentra na encosta da margem esquerda (P5 = 3,3966 mm/min).



Este contraste configura um gradiente lateral sólido com a ideia de que o deslocamento da água no solo deriva da ação conjunta da gravidade e das resistências impostas pela disposição dos poros. Enquanto a força da gravidade faz a água fluir, vertical e lateralmente, a percolação

torna-se mais lenta quando atravessa os microporos, sugerindo que as variações observadas no transecto refletem diferenças na organização porosa das respectivas encostas (Lepsch, 2011).

4.1.2.1. Infiltração

A **Tabela 4** sintetiza os parâmetros principais dos ensaios de infiltração (tempo total, lâmina infiltrada final e taxas inicial, final e quase-estável) para os pontos P1–P6, padronizados em mm min^{-1} . Nota-se contraste marcante na margem direita, onde a encosta (P2) mostra a menor capacidade de infiltração (taxa quase-estável de $2,34 \text{ mm min}^{-1}$ e lâmina final de $98,0 \text{ mm}$), enquanto baixio (P1) e platô (P3) mantêm patamares mais elevados ($13,74$ e $17,28 \text{ mm min}^{-1}$) apesar de menores tempos de ensaio. Na esquerda, as três unidades exibem taxas finais e quase-estáveis altas e próximas entre si ($\approx 22,90$ a $23,42 \text{ mm min}^{-1}$), associadas a volumes infiltrados finais também superiores ($730,0$ – $842,0 \text{ mm}$), indicando um regime de infiltração mais elevado e relativamente uniforme entre as unidades quando comparado à margem direita.

Tabela 4 - Síntese das taxas de infiltração por unidade geomorfológica e margem (pontos P1–P6)

Margem	UG	Ponto	Tempo do ensaio (min)	Volume infiltrado final (cm)	Taxa inicial (1º min) (mm min^{-1})	Taxa média final (última leitura) (mm min^{-1})	Taxa quase-estável (média dos 5 últimos intervalos) (mm min^{-1})
Direita	Baixio	P1	26	34,3	38.0	13.19	13.74
	Encosta	P2	43	9,8	9.0	2.28	2.34
	Platô	P3	22	36,6	50.0	16.64	17.28
Esquerda	Baixio	P4	36	83,4	45.0	23.17	23.42
	Encosta	P5	33	73	72.0	22.12	22.90
	Platô	P6	38	84,2	45.0	22.16	23.00

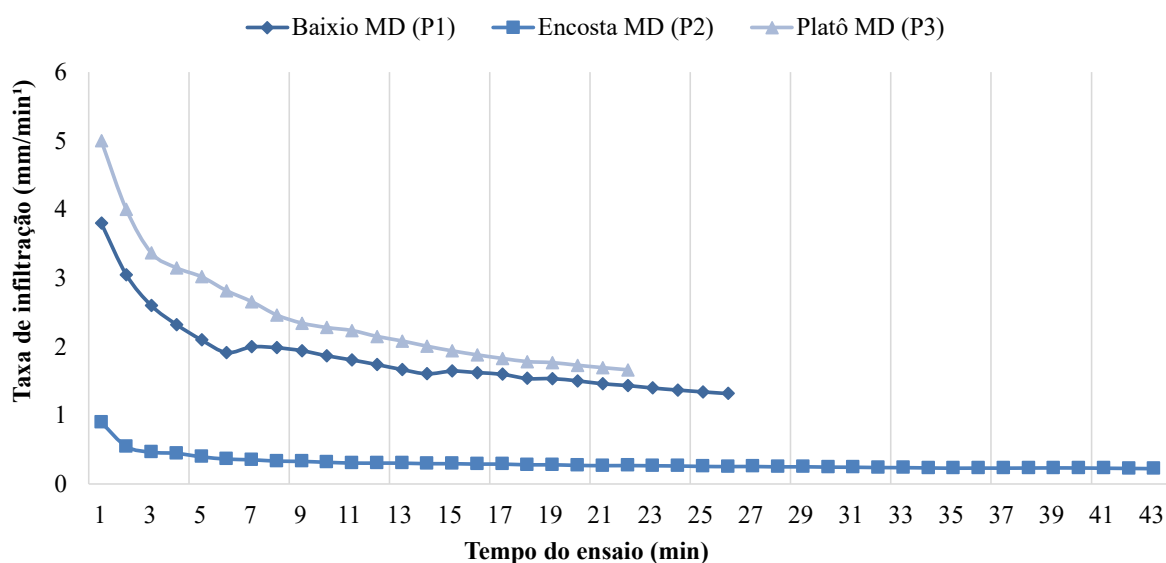
Nota: UG= Unidade geomorfológica

Fonte: Análises laboratoriais. Organização: André Alves (2025).

Na margem direita, os resultados indicam diferenças entre as unidades geomorfológicas (**Figura 23**), com decaimento relevante das taxas nos primeiros minutos e posterior aproximação de um patamar de menor variação. O baixio (P1) e o platô (P3) apresentam valores superiores ao longo do ensaio, mantendo-se acima da encosta (P2), que permanece com taxas reduzidas em todo o período monitorado. Em termos quantitativos, o Quadro 4 indica que o baixio (P1) apresentou taxa inicial de $38,0 \text{ mm min}^{-1}$, decrescendo até $13,19 \text{ mm min}^{-1}$ na última leitura e aproximando-se de $13,74 \text{ mm min}^{-1}$ no patamar quase-estável (média dos cinco últimos intervalos), com $343,0 \text{ mm}$ infiltrados ao final de 26 min. O platô (P3) exibiu o maior pulso

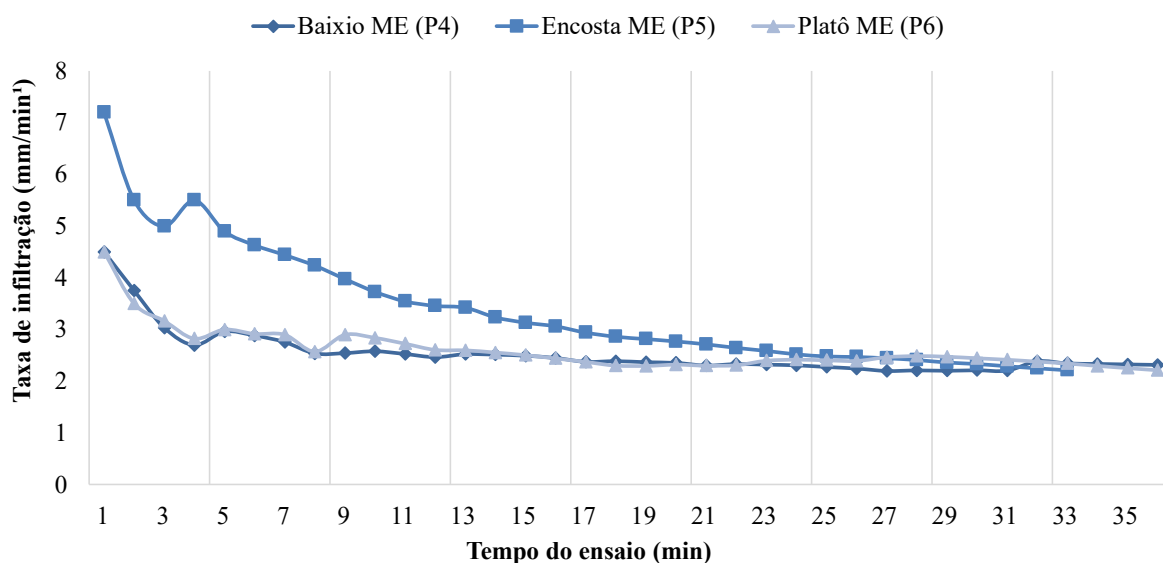
inicial da margem ($50,0 \text{ mm min}^{-1}$) e patamar quase-estável de $17,28 \text{ mm min}^{-1}$, com $366,0 \text{ mm}$ infiltrados em 22 min . Em contraste, a encosta (P2) apresentou as menores taxas: $9,0 \text{ mm min}^{-1}$ no primeiro minuto, taxa final de $2,28 \text{ mm min}^{-1}$ e patamar quase-estável de $2,34 \text{ mm min}^{-1}$, com $98,0 \text{ mm}$ infiltrados ao final de 43 min . Assim, dentro da margem direita, a encosta se destaca como o setor de menor capacidade de infiltração no ensaio, enquanto baixio e platô mantêm patamares finais/quase-estáveis mais elevados.

Figura 23 - Curvas de taxa de infiltração – Margem Direita (P1–P3)



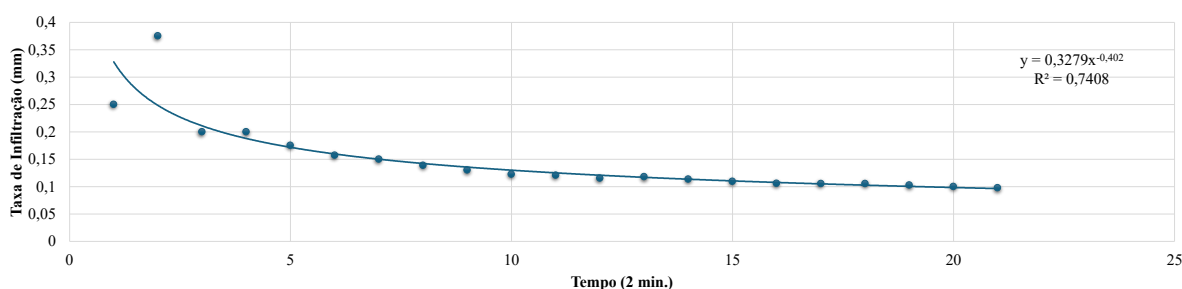
Fonte: Análises laboratoriais. **Organização:** André Alves (2025).

Na margem esquerda, as três unidades geomorfológicas exibem taxas elevadas após o decaimento inicial, com tendência de convergência para patamares próximos ao longo do ensaio (**Figura 24**). Observa-se que a encosta (P5) apresenta valores mais altos nos minutos iniciais, enquanto baixio (P4) e platô (P6) mostram desempenho parecido e aproximam-se gradualmente de uma faixa comum nas leituras finais. Em termos quantitativos, o baixio (P4) apresentou taxa inicial de $45,0 \text{ mm min}^{-1}$, taxa final de $23,17 \text{ mm min}^{-1}$ e patamar quase-estável de $23,42 \text{ mm min}^{-1}$, com $834,0 \text{ mm}$ infiltrados em 36 min . A encosta (P5) registrou o maior valor inicial do conjunto ($72,0 \text{ mm min}^{-1}$), taxa final de $22,12 \text{ mm min}^{-1}$ e patamar quase-estável de $22,90 \text{ mm min}^{-1}$, totalizando $730,0 \text{ mm}$ em 33 min . O platô (P6) manteve comportamento semelhante ao baixio, com taxa inicial de $45,0 \text{ mm min}^{-1}$, taxa final de $22,16 \text{ mm min}^{-1}$, patamar quase-estável de $23,00 \text{ mm min}^{-1}$ e $842,0 \text{ mm}$ ao final de 38 min . A margem esquerda, nesse sentido, sustenta um regime de infiltração mais alto e relativamente uniforme entre unidades quando se considera o patamar final/quase-estável, apesar das diferenças no pulso inicial.

Figura 24 - Curvas de taxa de infiltração – Margem Esquerda (P4–P6)

Fonte: Análises laboratoriais. Organização: André Alves (2025).

Além dos ensaios realizados nos pontos P1–P6, foi avaliado um ponto adicional em setor de uso humano (P7), caracterizado por solo urbano submetido a práticas de cultivo, com o objetivo de contrastar seu comportamento infiltrativo com as unidades geomorfológicas amostradas nas duas margens. Nesse ponto, as medições revelam um comportamento hidrológico mais restritivo, com taxas iniciais baixas e rápida estabilização em patamar reduzido. (*Figura 25*).

Figura 25 - Curvas de taxa de infiltração, P7 – Margem Direita

Fonte: Análises laboratoriais. Organização: André Alves (2025).

A taxa inicial de infiltração já se mostra baixa, em torno de 0,30–0,35 mm/min, decaindo até valores estáveis próximos de 0,10 mm/min. Esse desempenho está associado às condições específicas da área analisada, distinta por uso agrícola com irrigação frequente, o que favorece a saturação do solo.

A rápida estabilização da infiltração em patamar tão reduzido indica fechamento precoce dos macroporos e domínio quase exclusivo da infiltração por microporos, configurando um regime no qual o escoamento superficial tende a prevalecer mesmo sob eventos pluviométricos de baixa intensidade. Esses valores são inferiores aos registrados nos Pontos 2 e 3 da margem direita, evidenciando que o solo urbano cultivado, submetido a regas recorrentes, opera sob condição hidrológica ainda mais limitante quando comparado às áreas não cultivadas da bacia.

Nota-se que a variabilidade espacial do processo não se expressa apenas nos volumes infiltrados, mas sobretudo no modo como cada unidade converge para o patamar quase-estável ao longo do experimento. Destaca-se que a margem direita apresenta maior heterogeneidade entre unidades, com uma resposta mais restritiva na encosta, enquanto na margem esquerda os pontos tendem a um comportamento final mais uniforme e com taxas elevadas. Esse padrão reforça a necessidade de interpretar a infiltração como resultado integrado de condições de superfície e de subsuperfície (continuidade e conectividade do sistema poroso, presença relativa de macro e microporos e organização estrutural).

4.1.2.2. Porosidade e infiltração

A comparação entre *PT* e infiltração quase-estável mostra que a relação esperada entre “mais poros = mais infiltração” não se revela de modo linear no conjunto dos pontos amostrados (P1–P6). Isso é coerente com a própria natureza da *PT*, pois a porosidade total não distingue o tamanho nem a conectividade dos poros, uma vez que a porosidade total reúne poros de diferentes tamanhos e que o volume total de poros é o somatório de todos os tamanhos sejam eles grandes, médios e pequenos (Lepsch, 2011).

Na margem esquerda, as taxas quase-estáveis permanecem elevadas e muito próximas entre si ($P_4 = 23,42$; $P_5 = 22,90$; $P_6 = 23,00 \text{ mm min}^{-1}$), mesmo com *PT* concentrada em faixa relativamente estreita ($\sim 45\text{--}48\%$). Esse desempenho sugere resposta infiltrativa uniforme entre as unidades geomorfológicas amostradas nessa margem, ao menos no intervalo temporal do ensaio. Já na margem direita, observa-se maior dispersão: P2 apresenta a menor taxa quase-estável ($2,34 \text{ mm min}^{-1}$) apesar de *PT* elevada ($54,51\%$), contrastando com P1 ($13,74 \text{ mm min}^{-1}$; $P_t = 44,02\%$) e P3 ($17,28 \text{ mm min}^{-1}$; $P_t = 54,42\%$) (**Tabela 5**).

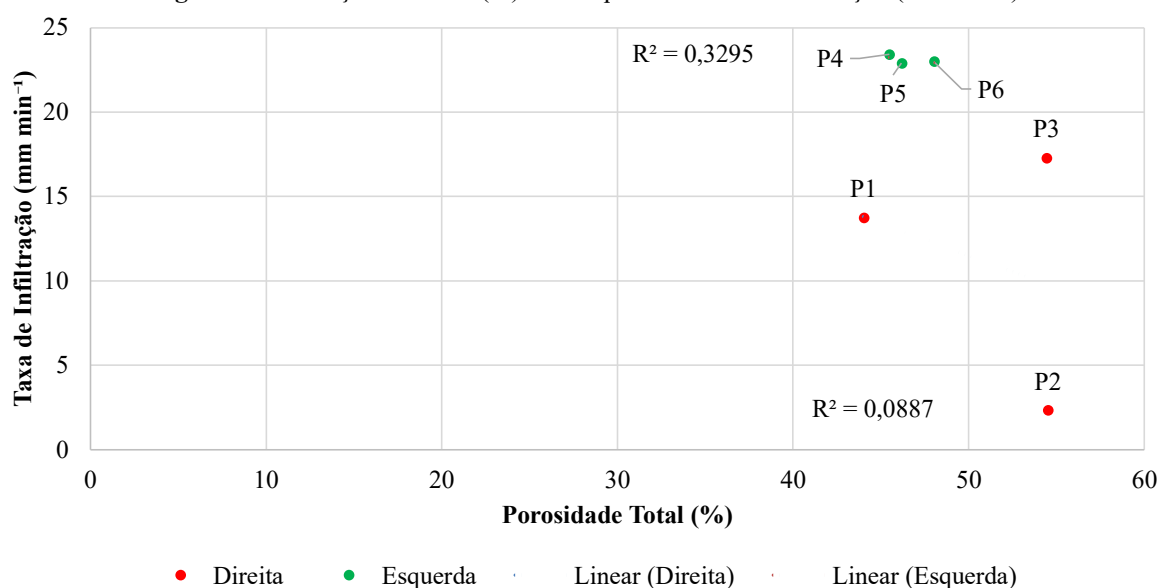
Tabela 5 - Infiltração quase estável, argila e porosidade total por ponto (P1–P6)

Margem	Ponto	Unidade geomorfológica	Taxa quase-estável (mm/ min ⁻¹)	Argila (%)	Porosidade total (%)
Direita	P1	Baixio	13,74	23,55	44,02
	P2	Encosta	2,34	64,92	54,51
	P3	Platô	17,28	75,60	54,42
Esquerda	P4	Baixio	23,42	19,50	45,48
	P5	Encosta	22,90	38,87	46,18
	P6	Platô	23,00	28,40	48,02

Fonte: Análises laboratoriais. **Organização:** André Alves (2025).

Na margem direita, a diferença entre P2 e P3 é esclarecedor: ambos exibem porosidade total praticamente igual (54,51% e 54,42%), porém taxas quase estáveis muito distintas (2,34 e 17,28 mm min⁻¹). Esse resultado indica que, mesmo em condições de PT alta, a infiltração pode ser limitada quando o sistema poroso é dominado por poros pouco eficientes para transmitir água no intervalo analisado, enquanto valores menores de PT podem coexistir com vias preferenciais mais ativas e maior condutividade efetiva.

Esse desempenho reforça que a porosidade total (*PT*), quando analisada isoladamente, não explica de forma consistente a variação da taxa de infiltração quase estável entre os pontos amostrados. Observa-se que valores semelhantes de PT podem estar associados a desempenhos infiltrativos muito distintos, sugerindo que a resposta hidrológica do solo depende menos da quantidade total de poros e mais de como esses poros se organizam e se conectam para formar trajetórias efetivas de percolação durante o ensaio (**Figura 26**).

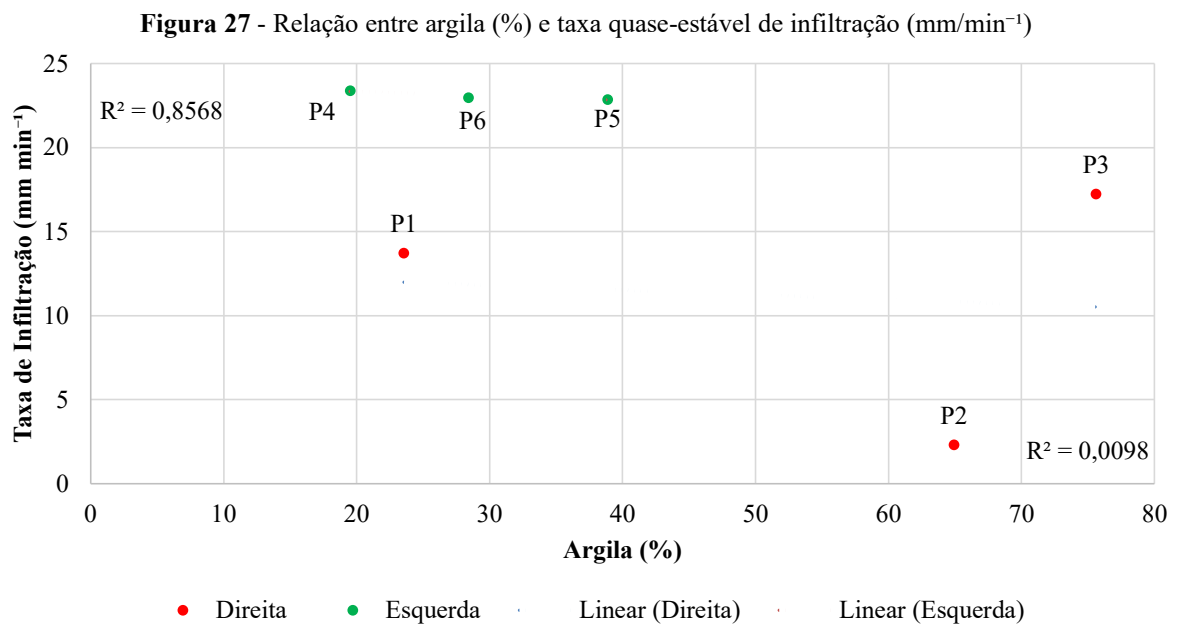
Figura 26 - Relação entre PT (%) e taxa quase-estável de infiltração (mm/min⁻¹)

Fonte: Análises laboratoriais. **Organização:** André Alves (2025)

Na margem direita, o padrão é marcadamente heterogêneo: P2 combina argila elevada (64,92%) com a menor taxa quase-estável (2,34 mm min⁻¹), ao passo que P1 (23,55% de argila) e P3 (75,60% de argila) apresentam taxas bem superiores (13,74 e 17,28 mm min⁻¹). Esse contraste indica que, além do teor de argila, fatores como estrutura, agregação, continuidade de macroporos e possíveis restrições físicas locais (selamento/compactação) são hipóteses mais consistentes para explicar a diferença de desempenho infiltrativo entre unidades.

Esse comportamento reforça que a relação entre teor de argila e infiltração não se apresenta de forma direta: solos mais argilosos podem conduzir a água mais lentamente quando o fluxo depende de poros menores e mais tortuosos, enquanto teores elevados também podem coexistir com infiltração relativamente alta quando existem vias preferenciais e conectividade adequada do sistema poroso.

Os dados mostram que, na bacia do Puraquequara, a infiltração quase-estável deve ser interpretada como resultado de um controle integrado: *PT* e textura fornecem o contexto físico, mas a taxa observada no ensaio depende principalmente da organização funcional do sistema poroso (continuidade, conectividade e vias preferenciais), aspecto que ajuda a explicar por que pontos com *PT* semelhante (como P2 e P3) exibem desempenhos infiltrativos tão diferentes (*Figura 27*).



Fonte: Análises laboratoriais. **Organização:** André Alves (2025)

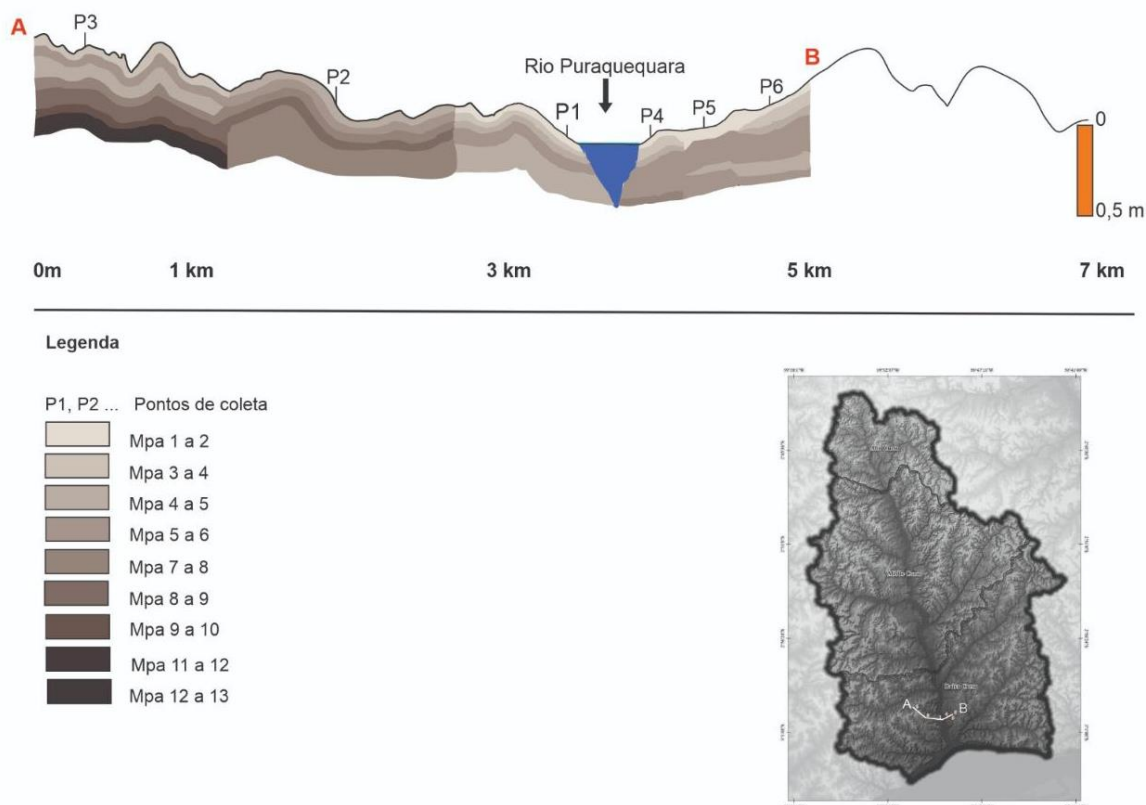
4.1.3. Resistência mecânica dos solos

A resistência à penetração (RP) é adotada como indicador do estado mecânico do solo ao longo do perfil, sintetizando respostas associadas à organização estrutural e à constituição textural dos materiais.

4.1.3.1. Penetração e resistência à compactação

A análise da infiltração da água no solo ao longo de um perfil topográfico transversal (**Figura 28**), com pontos distribuídos em distintos compartimentos geomorfológicos, possibilita avaliar as variações na resistência do solo e inferir padrões de infiltração ligados à posição topográfica, além do comportamento de ambas as margens. Os perfis de resistência à penetração (RP), medidos entre 5 e 50 cm e sintetizados pela média de três repetições por profundidade, evidenciam diferenças verticais e laterais entre margens e entre unidades geomorfológicas.

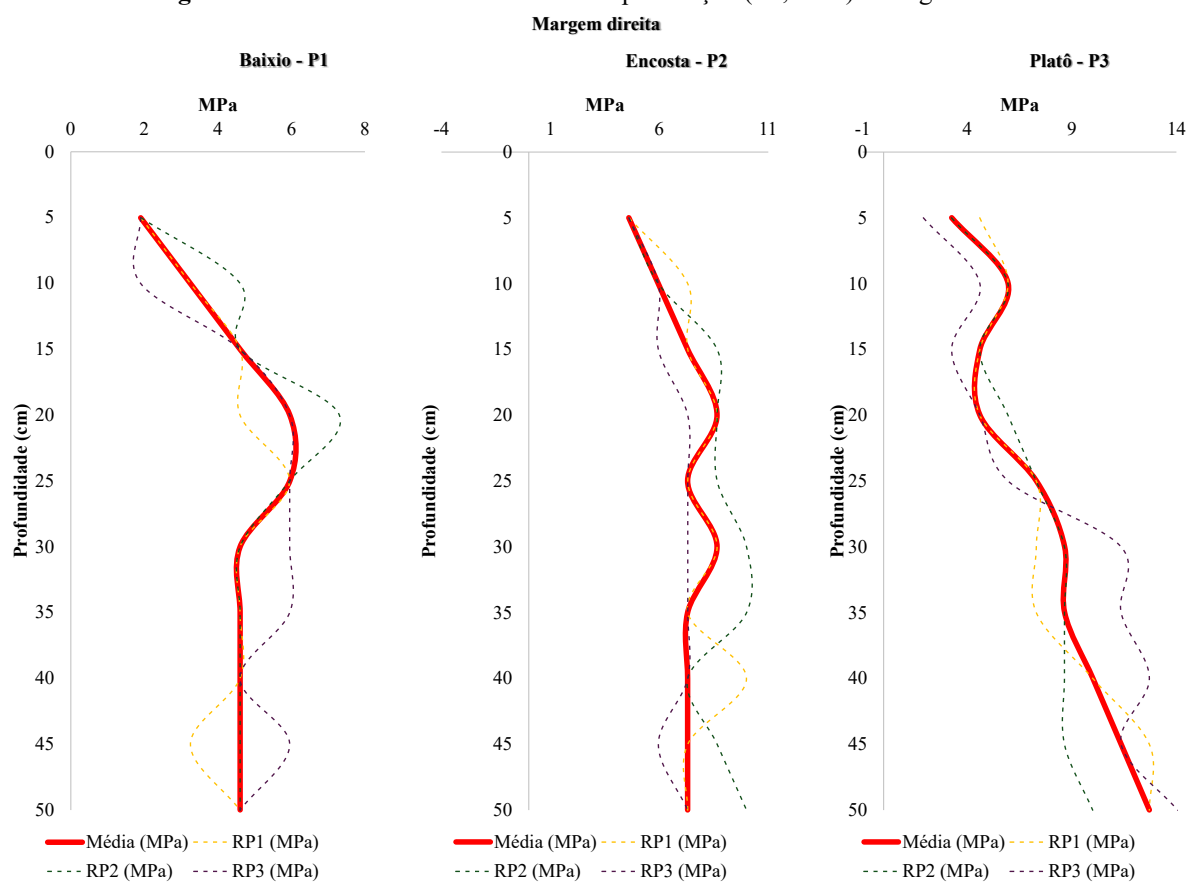
Figura 28 - Transecto A–B, localização dos pontos de resistência do solo (P1–P6)



Nota: A = margem direita; B = margem esquerda. **Organização:** Antonio Fábio Sabbá Guimarães Vieira (2026).

Na margem direita, nota-se maior amplitude de *RP* entre pontos, indicando diferenciação mecânica mais marcada ao longo do gradiente baixo–encosta–platô. O P1 (baixo) inicia com valores baixos a moderados (1,9 MPa em 5 cm), atinge patamar mais alto em 20–25 cm (5,95 MPa) e tende a estabilizar em torno de 4,6 MPa nas maiores profundidades, sugerindo aumento moderado de resistência com a profundidade. O P2 (encosta) apresenta um padrão mais resistente ao longo de todo o perfil, com *RP* já elevada a 5 cm (4,6 MPa) e manutenção de valores altos na maior parte do intervalo 5–50 cm, com ocorrências frequentes em torno de 7,3–8,65 MPa e picos pontuais associados a maiores impactos em determinadas camadas. O P3 (platô) combina resistência intermediária nas camadas rasas com incremento progressivo em profundidade, alcançando seus maiores patamares nas camadas profundas (por exemplo, médias acima de 10 MPa em 40–50 cm na série do platô direito), ajustadas com endurecimento subsuperficial e maior restrição mecânica em profundidade (**Figura 29**).

Figura 29 - Perfis verticais da resistência à penetração (*RP*, MPa) - margem direita

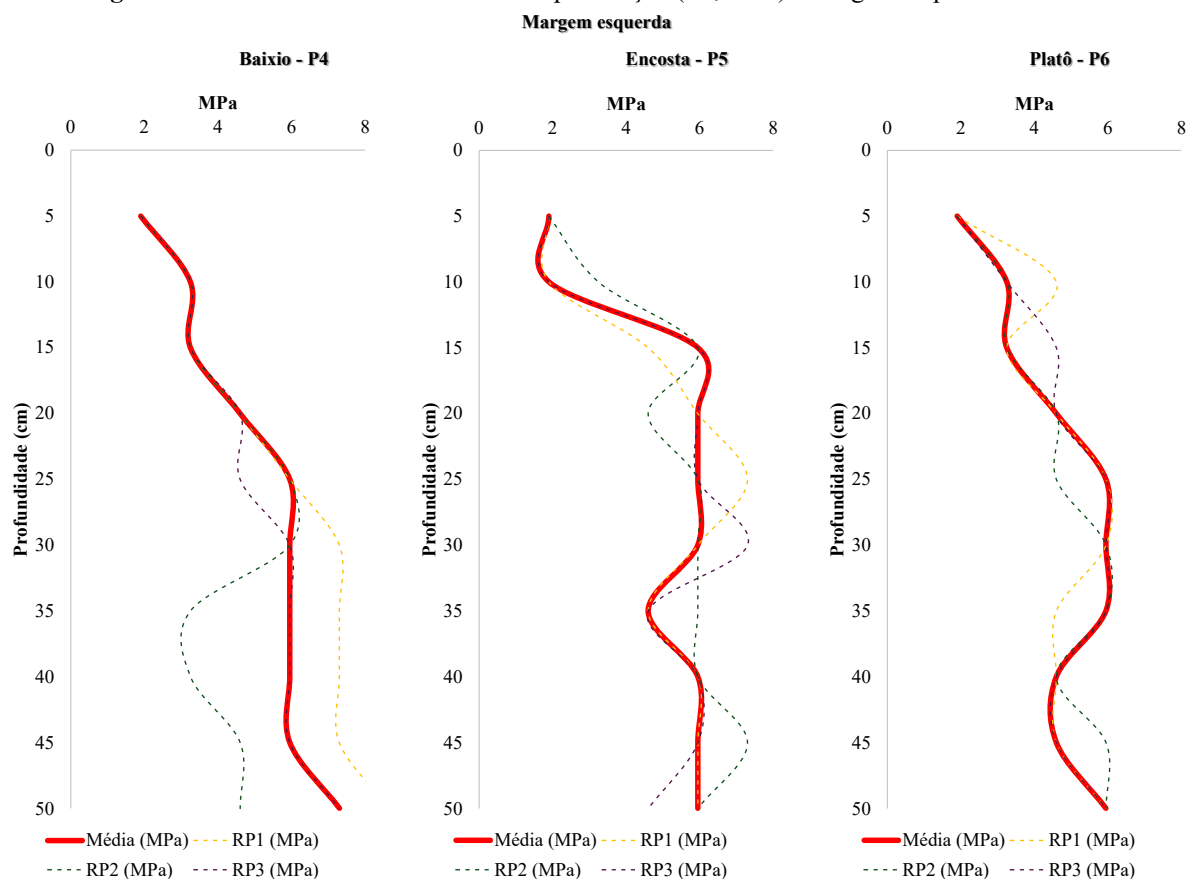


Fonte: Análises laboratoriais. **Organização:** André Alves (2025)

Na margem esquerda, os perfis tendem a ser mais homogêneos entre si, embora também mostrem aumento de *RP* com a profundidade e variações pontuais entre camadas. O P4 (baixo)

passa de 1,9 MPa em 5 cm para um patamar de 5,95 MPa entre 25–45 cm, alcançando valores mais altos em 50 cm, ao ponto que P5 (encosta) e P6 (platô) exibem transição de valores baixos/moderados na superfície para patamares próximos de 5,95 MPa a partir de 20–25 cm, com diminuições localizadas em algumas profundidades. Comparativamente, destaca-se que a encosta da margem direita (P2) é sistematicamente mais resistente do que a encosta da margem esquerda (P5) no intervalo 5–50 cm, enquanto o platô da margem direita (P3) apresenta os maiores incrementos de RP em profundidade quando comparado ao platô da margem esquerda (P6), reforçando a existência de contrastes laterais entre margens além do gradiente topográfico (*Figura 30*).

Figura 30 - Perfis verticais da resistência à penetração (RP, MPa) - margem esquerda

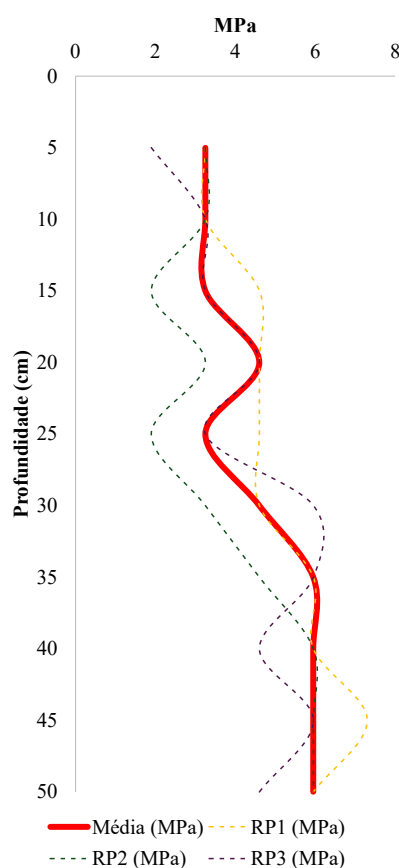


Fonte: Análises laboratoriais. Organização: André Alves (2025)

Na margem esquerda, os perfis de RP são levemente mais homogêneos entre unidades e convergem para patamares intermediários nas camadas subsuperficiais (5–50 cm), com oscilações pontuais ao longo do perfil.

Os dados do penetrômetro coletados no ambiente urbano revelam valores médios elevados de resistência à penetração desde as camadas superficiais, mantendo-se relativamente homogêneos, a partir dos 35 cm de profundidade, com baixas variações entre as repetições (*Figura 31*). Esse padrão indica a presença de compactação estrutural persistente, típica de solos agrícolas submetidos a preparo mecanizado recorrente, como o revolvimento por trator para aração do terreno.

Figura 31 - Perfis verticais da resistência à penetração (RP, MPa) - margem direita



Fonte: Análises laboratoriais. Organização: André Alves (2025).

Nesses contextos, o manejo mecânico tende a promover a desagregação superficial temporária, sem resultar em reestruturação efetiva da matriz do solo, causando a redistribuição das tensões e a formação de camadas compactadas subsuperficiais. A coexistência de elevada resistência mecânica e taxas de infiltração muito reduzidas evidencia um solo estruturalmente rígido e hidraulicamente ineficiente.

4.1.3.2. Implicações geomorfológicas

Do ponto de vista geomorfológico, a variação da RP ao longo do perfil fornece um indicador objetivo de camadas com maior ou menor resistência mecânica, o que tende a modular a resposta do sistema solo–vertente frente a fluxos superficiais e subsuperficiais. Dentro dessa lógica, perfis com RP elevada e persistente (caso do P2) sugerem condições menos favoráveis à continuidade de poros estruturais efetivos, o que pode contribuir para respostas hidrológicas mais concentradas e, por consequência, para maior sensibilidade a processos de degradação superficial nas unidades mais expostas.

A comparação entre pontos com maior resistência (a título de exemplo, encosta/platô na margem direita) e aqueles com menor resistência relativa nas camadas superficiais (como P5 e P6 em 5–10 cm) permite sustentar, com base nos dados, que a distribuição vertical da resistência é um componente adicional da sensibilidade geomorfológica: onde a resistência é mais alta e contínua ao longo do perfil, há maior probabilidade de o solo operar com menor “plasticidade funcional” frente a distúrbios (pisoteio, tráfego, selamento parcial, perda de estrutura), enquanto perfis com camadas superficiais menos resistentes podem responder de forma distinta, sobretudo dependendo da manutenção (ou perda) da estrutura porosa nas camadas rasas.

4.2. A INTENSIDADE E A ESPACIALIZAÇÃO DAS INTERVENÇÕES HUMANAS NAS UNIDADES DE PAISAGEM DA BHRP

Se a seção anterior se concentrou na resposta física dos solos como expressão direta da sensibilidade das unidades de paisagem, este segundo objetivo desloca o foco para o fator de estresse responsável por modular, acelerar ou deflagrar tais respostas: a intervenção humana e sua distribuição espacial ao longo da bacia hidrográfica do rio Puraquequara.

A análise aqui feita não se limita à identificação das áreas ocupadas ou à quantificação da expansão urbana e agrícola. Parte-se do pressuposto de que a ação humana atua como força reorganizadora da paisagem, capaz de alterar a forma como os sistemas naturais funcionam, mesmo quando a base morfoestrutural continua inalterada. Logo, o interesse central não reside apenas no “quanto” a paisagem foi modificada, mas em que medida essas intervenções incidem sobre unidades com diferentes resistências próprias, ativando níveis distintos de sensibilidade.

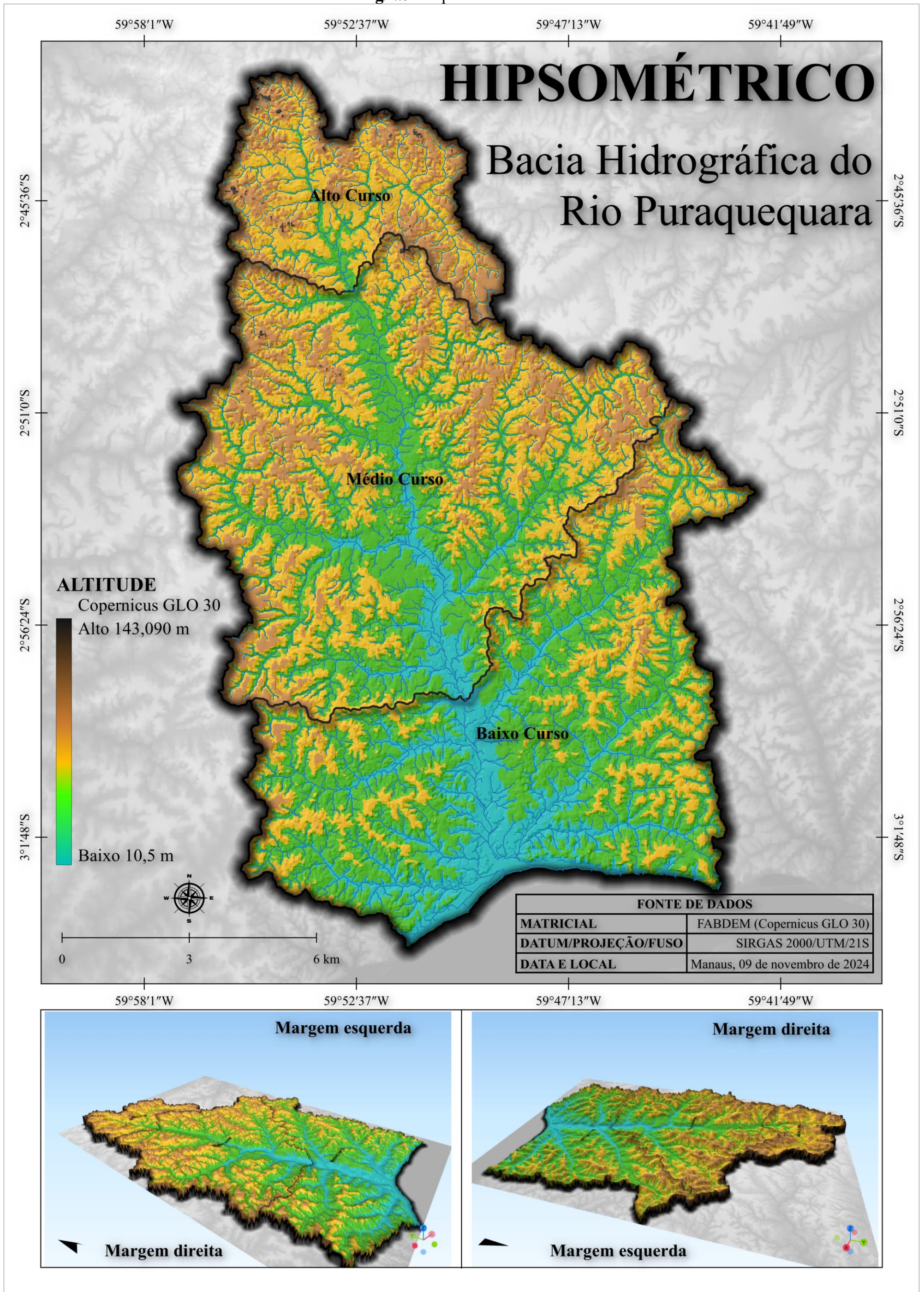
Nesse sentido, o uso e a ocupação da terra são tratados como processos geomorfológicos indiretos, cuja influência se manifesta por meio da redistribuição de fluxos de energia e matéria, da ruptura de conexões ecológicas e da alteração dos tempos de resposta do sistema. A expansão urbana, a abertura de vias, o desmatamento e o manejo agrícola não produzem, por si só, novas formas de relevo, mas reconfiguram profundamente o modo como o relevo existente responde aos agentes naturais, especialmente à água.

Dessa forma, esta seção procura compreender como a distribuição espacial das ações humanas dialoga com a base morfoestrutural da bacia, condicionando a ativação de processos erosivos, a intensificação do escoamento superficial e a reorganização funcional das unidades de paisagem. Mais do que um inventário cartográfico, a análise proposta pretende revelar os mecanismos pelos quais a ação humana amplia, acelera ou desloca os limiares de resposta do sistema geomorfológico, preparando o terreno para a compreensão integrada da sensibilidade da paisagem ao longo do tempo.

4.2.1. Análise morfoestrutural e predisposição geomorfológica à intervenção humana

A interpretação do mapa altimétrico da BHRP (**Figura 32**) introduz a dimensão vertical da organização da paisagem como fator estruturante da sensibilidade geomorfológica, ao provar

Figura 32 - Mapa altimétrico da BHRP



como a distribuição altimétrica condiciona o gradiente de energia disponível para os processos hidrológicos, erosivos e de transferência de sedimentos. Mais do que uma simples variação de cotas, a hipsometria expressa a hierarquia funcional da bacia, definindo a posição relativa das unidades de paisagem no sistema e regulando a forma como perturbações locais podem ou não se propagar espacialmente.

O modelo digital de elevação, reclassificado em quatro faixas altimétricas principais, variando de 10,5 m a aproximadamente 143 m, revela um arranjo em patamares sucessivos que estruturam o funcionamento longitudinal da bacia. Essas faixas não correspondem somente intervalos altimétricos, mas retratam a conjuntos de unidades de paisagem com desempenhos geomorfológicos distintos, dotados de diferentes capacidades de armazenamento, dissipação ou transferência de energia.

A faixa altimétrica inferior, entre 11 e 48 m, concentra-se no baixo curso e está associada às superfícies de influência do grande rio Amazonas, onde predominam planícies de inundação e terraços baixos, com relevo pouco dissecado e elevada conectividade hidrológica longitudinal. Nesses setores, a posição hipsométrica reduzida sugere acoplamento direto com o nível de base regional, de modo que qualquer intervenção humana (como expansão urbana, abertura de vias ou supressão da cobertura vegetal) tende a produzir resultados sistêmicos, comunicados para jusante rapidamente. Trata-se, assim, de unidades de paisagem de alta sensibilidade funcional, nas quais pequenas alterações no uso da terra são capazes para levar reações hidrossedimentares amplificadas, como acréscimo do escoamento superficial, assoreamento e reorganização dos canais.

A faixa intermediária de 48 a 66 m corresponde a patamares de transição que marcam a passagem entre as superfícies baixas do baixo curso e as colinas do médio curso. Esses setores ocupam posição estratégica na hierarquia altimétrica da bacia, funcionando como zonas de redistribuição de fluxos e de conexão entre unidades de diferentes níveis de energia potencial. A sensibilidade dessas unidades é profundamente condicionada pela combinação com atributos morfométricos locais (principalmente declividade e forma das vertentes) podendo variar de moderada a alta conforme o grau de intervenção humana e o nível de preservação da cobertura do solo.

A faixa contida entre 66 e 86 m engloba colinas mais elevadas e interflúvios suavemente convexas, sobre os quais se desenvolvem grande parte das vertentes onduladas da bacia. Nessa posição hipsométrica intermediária-superior, as unidades de paisagem possuem maior energia potencial em relação ao baixo curso, mas ainda mantêm certa capacidade de amortecimento dos

fluxos, especialmente quando associadas a formas divergentes e solos relativamente espessos. A sensibilidade nesses setores não é intrínseca à altitude em si, mas emerge da interação entre posição altimétrica, convergência de fluxos e uso da terra, tornando-se significativamente mais alta quando intervenções lineares ou desmatamentos se instalam sobre vertentes convergentes.

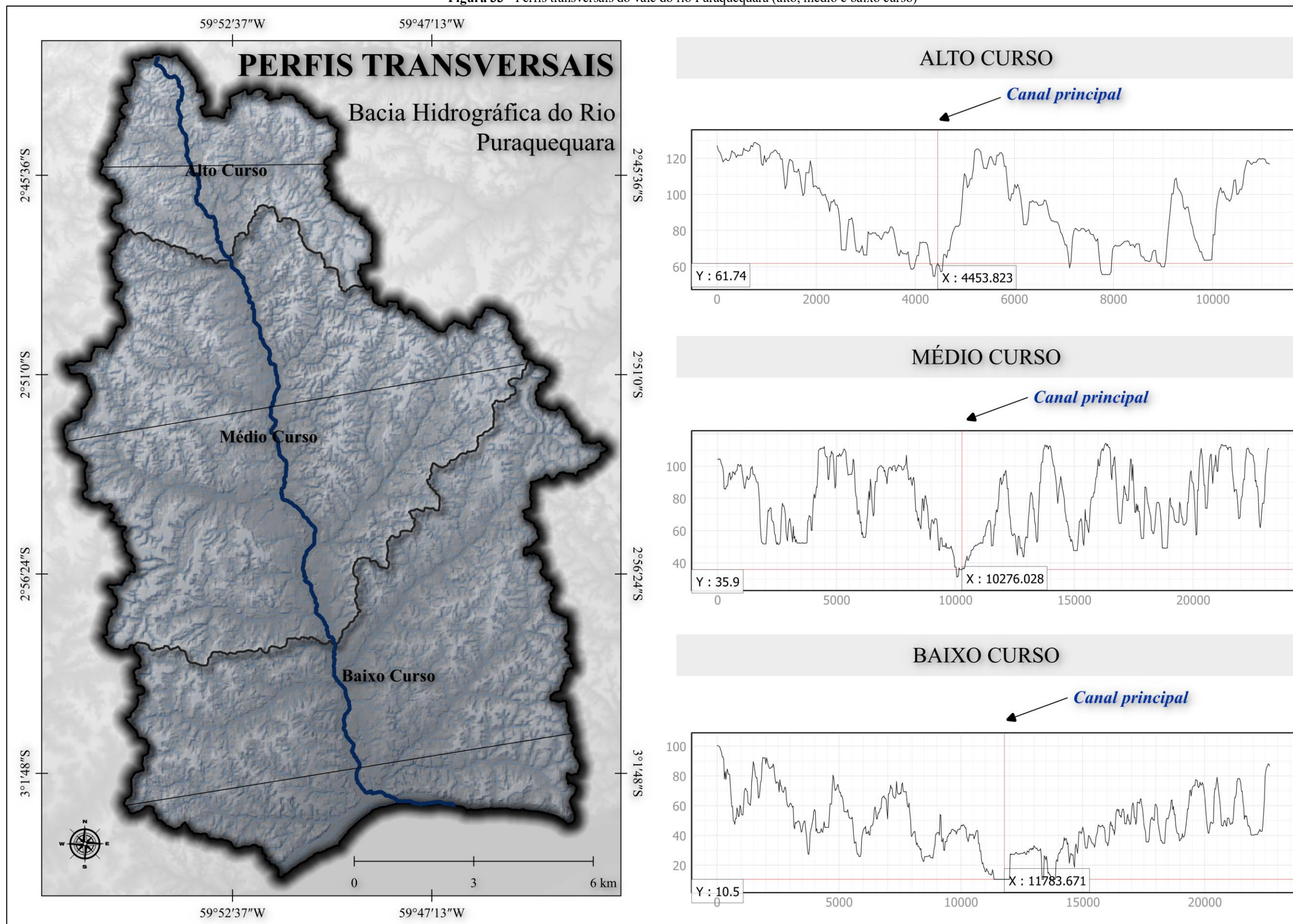
A faixa altimétrica superior, entre 86 e 143 m, concentra-se no alto curso da bacia, onde predominam interflúvios alongados e vales mais encaixados. Esses compartimentos contêm o domínio de maior energia potencial da BHRP e desempenham papel fundamental na geração e organização dos fluxos que alimentam os setores a jusante. Ainda que frequentemente menos ocupados, em função da maior dificuldade de acesso e da presença de áreas preservadas, esses setores não devem ser explicados como de baixa sensibilidade. Ao contrário, ações localizadas nessas cotas elevadas podem produzir efeitos desproporcionais, uma vez que transformações nos processos de geração de escoamento e erosão tendem a ser propagadas ao longo de toda a rede de drenagem, afetando unidades situadas em níveis altimétricos inferiores.

Do ponto de vista longitudinal, a associação entre baixo curso (11–48 m), médio curso (48–86 m) e alto curso (>86 m) evidencia que a hipsometria atua como eixo organizador da sensibilidade da paisagem, ao definir não apenas onde a energia potencial é gerada, mas também onde ela tende a ser acumulada, dissipada ou transferida ao longo da BHRP.

Para complementar essa leitura da organização vertical da BHRP e explicitar, em corte, como a compartimentação topográfica participa da distribuição da sensibilidade da paisagem, a **Figura 33** apresenta perfis transversais representativos dos setores de alto, médio e baixo curso, com indicação da posição do canal principal. Em conjunto, esses perfis permitem observar a posição relativa das vertentes e do fundo de vale em compartimentos que, no contexto da bacia, correspondem a diferentes níveis de energia potencial e a distintas condições de armazenamento, dissipação e transferência de fluxos.

Os perfis transversais mostram que a compartimentação da BHRP não se expressa apenas ao longo do eixo longitudinal do canal, mas também na organização lateral das vertentes. Essa disposição transversal ajuda a compreender por que a sensibilidade varia entre os setores da bacia, uma vez que a posição topográfica relativa das vertentes e sua conexão com o canal condicionam a forma como perturbações locais podem ser amortecidas, redistribuídas ou propagadas ao longo do sistema. Nessa perspectiva, a figura reforça que a sensibilidade não decorre isoladamente da altitude ou da declividade, mas da interação entre forma, conectividade e posição no relevo, acrescentando uma dimensão morfoestrutural à interpretação da BHRP.

Figura 33 - Perfis transversais do vale do rio Puraquequara (alto, médio e baixo curso)



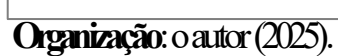
Organização: o autor (2025)

A partir desse arranjo vertical da bacia, o mapa de declividade (**Figura 34**) aprofunda a análise ao traduzir o gradiente altimétrico em diferenças efetivas de inclinação das vertentes. Ele permite compreender como a energia potencial identificada na hipsometria se converte, de maneira espacialmente diferenciada, em energia disponível para os processos de escoamento superficial, erosão e transporte de sedimentos.

As encostas foram agrupadas em cinco classes: plano (0–3%), suave ondulado (3–8%), ondulado (8–20%), forte ondulado (20–45%) e íngreme (>45%). Deste modo, possibilitou-se quantificar a distribuição das áreas segundo seu grau de inclinação e, por conseguinte, segundo sua tendência geomorfológica à concentração de fluxos. Os resultados apontam o predomínio de superfícies planas, que correspondem a 40,61% da área da bacia (283,821 km²), seguidas pelas classes suave ondulado (24,66%; 172,345 km²) e ondulado (17,17%; 119,980 km²). As declividades forte onduladas representam 17,12% da área (119,650 km²), enquanto as encostas íngremes, com inclinações superiores a 45%, ocupam apenas 0,44% da BHRP (3,042 km²).

Em conjunto, esses valores mostram uma paisagem na qual aproximadamente de dois terços da superfície (65,27%) apresentam declividades inferiores a 8%, conjuntura que tende a favorecer a infiltração e a dissipação local da energia do escoamento. Todavia, um contingente expressivo de áreas com declividades superiores a 8% (cerca de 34,7% da bacia) reúne a maior parte da energia disponível para a geração de fluxos superficiais mais rápidos e potencialmente erosivos. Essa coexistência entre amplas superfícies de baixa inclinação e setores pontuais de maior declividade constitui um dos elementos estruturantes da sensibilidade diferenciada das unidades de paisagem da BHRP.

Do ponto de vista espacial, o mapa evidencia que as superfícies planas se distribuem principalmente ao longo do baixo curso e nas planícies associadas ao canal principal e a seus tributários de ordem inferior, robustecendo o papel desse setor como zona de menor energia relativa e de forte acoplamento com o nível de base fluvial. As classes suave ondulado e ondulado predominam no médio curso, articulando as transições entre as superfícies mais baixas e os patamares elevados do alto curso. Já as declividades forte onduladas e os núcleos restritos de encostas íngremes concentram-se sobretudo em interflúvios e cabeceiras do alto curso, onde os vales se mostram mais encaixados e a dissecação do relevo é mais acentuada.



Esse arranjo longitudinal reforça e detalha a hierarquia já sugerida pela hipsometria: o alto curso concentra os trechos de maior capacidade de geração de fluxos erosivos; o médio curso atua como zona de transferência e, em determinados contextos, de amplificação desses fluxos; e o baixo curso funciona predominantemente como área de dissipação e deposição preferencial. Assim, a declividade atua como elemento intermediário entre a posição altimétrica das unidades e sua resposta geomorfológica efetiva frente às perturbações.

Em termos de predisposição geomorfológica, a distribuição das declividades indica que a BHRP reúne, em um mesmo sistema, unidades de paisagem com desempenhos contrastantes frente à ação humana. Nas extensas superfícies planas e suavemente onduladas, a ocupação tende a produzir respostas mais graduais, com maior capacidade de amortecimento e tempos de resposta mais longos. Em contrapartida, nos setores de relevo ondulado a fortemente ondulado, especialmente quando associados a formas de vertentes convergentes, a margem de tolerância do sistema é significativamente menor. Nesses contextos, pequenas intervenções são suficientes para aproximar rapidamente o sistema de limiares de instabilidade, favorecendo a ativação de processos erosivos lineares e o aumento da conectividade hidrossedimentar, aspecto que será aprofundado na análise integrada com o mapa de forma do terreno.

O mapa de forma das vertentes aprofunda a interpretação iniciada com a hipsometria e a declividade ao mostrar, de forma mais direta, como a curvatura do terreno controla a atuação da água nas encostas da BHRP (**Figura 35**). Ele revela onde o relevo tende a dispersar os fluxos superficiais e subsuperficiais e onde, ao contrário, beneficia sua concentração, aspecto central para compreender a sensibilidade das unidades de paisagem frente às ações humanas.

A classificação adotada distingue nove combinações de forma (convexa, retilínea ou côncava, associadas a padrões convergentes, planares ou divergentes) permitindo reconhecer, para cada setor da bacia, o modo dominante de organização dos fluxos e o grau de estabilidade potencial das vertentes. Essa leitura acrescenta uma dimensão funcional essencial à análise morfométrica, ao aproximar a forma do relevo de seus efeitos processuais.

Os resultados indicam um predomínio expressivo das vertentes retilíneo-planares, que ocupam 46,13% da área da bacia (322,343 km²). Em seguida, destacam-se as formas côncavo-planares (12,84%; 89,729 km²), retilíneo-divergentes (12,21%; 85,349 km²) e convexo-planares (3,46%; 24,173 km²). As formas convergentes (côncavo-convergente, retilíneo-convergente e convexo-convergente) totalizam cerca de 17,5% da superfície da BHRP, enquanto as formas divergentes constituem aproximadamente 20%. Em linhas gerais, isso denota que quase metade



da bacia apresenta vertentes relativamente neutras quanto à curvatura, enquanto parcelas semelhantes do território tendem, respectivamente, à dispersão ou à concentração dos fluxos.

superficiais e subsuperficiais e onde, ao contrário, beneficia sua concentração, aspecto central para compreender a sensibilidade das unidades de paisagem frente às ações humanas.

A classificação adotada distingue nove combinações de forma (convexa, retilínea ou côncava, associadas a padrões convergentes, planares ou divergentes) permitindo reconhecer, para cada setor da bacia, o modo dominante de organização dos fluxos e o grau de estabilidade potencial das vertentes. Essa leitura acrescenta uma dimensão funcional essencial à análise morfométrica, ao aproximar a forma do relevo de seus efeitos processuais.

Os resultados indicam um predomínio expressivo das vertentes retilíneo-planares, que ocupam 46,13% da área da bacia (322,343 km²). Em seguida, destacam-se as formas côncavo-planares (12,84%; 89,729 km²), retilíneo-divergentes (12,21%; 85,349 km²) e convexo-planares (3,46%; 24,173 km²). As formas convergentes (côncavo-convergente, retilíneo-convergente e convexo-convergente) totalizam cerca de 17,5% da superfície da BHRP, enquanto as formas divergentes constituem aproximadamente 20%. Em linhas gerais, isso denota que quase metade da bacia apresenta vertentes relativamente neutras quanto à curvatura, enquanto parcelas semelhantes do território tendem, respectivamente, à dispersão ou à concentração dos fluxos.

Esse arranjo tem implicações diretas para a sensibilidade geomorfológica da paisagem. Nas extensas áreas retilíneo-planares, sobretudo quando associadas a declividades baixas ou moderadas, o escoamento superficial tende a ocorrer de forma mais distribuída ao longo das encostas. Nesses contextos, a geração de sulcos profundos é menos eficiente, e a infiltração pode desempenhar papel importante, desde que a cobertura vegetal se mantenha preservada. Essas unidades funcionam, portanto, como setores de amortecimento relativo, nos quais as respostas às intervenções humanas tendem a ser mais graduais e, em certos casos, reversíveis.

Em contraste, as vertentes côncavo-planares e, especialmente, as côncavo-convergentes e retilíneo-convergentes apresentam comportamento muito distinto. Nessas formas, a curvatura do terreno orienta progressivamente a água para linhas de menor energia potencial, aumentando a concentração dos fluxos e a eficiência do escoamento superficial. Quando essas formas coincidem com declividades mais elevadas, criam-se condições favoráveis à formação de canais de cabeceira, ravinas profundas e outros processos erosivos lineares. Nesses setores, pequenas alterações na cobertura do solo ou na rugosidade superficial são suficientes para gerar respostas geomorfológicas desproporcionais, provando um grau elevado de sensibilidade da paisagem.

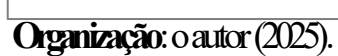
Na perspectiva espacial, o mapa mostra que as vertentes retilíneo-planares e divergentes distribuem-se de maneira mais contínua ao longo do baixo e do médio curso, acompanhando superfícies de menor energia relativa e colinas de topos mais amplos. As formas convergentes, por sua vez, aparecem de modo mais concentrado em encostas voltadas para os vales principais e para as cabeceiras de drenagem, especialmente no médio e no alto curso, onde a dissecação do relevo é mais intensa. Essa distribuição reforça a ideia de que a BHRP não se organiza apenas como um gradiente altimétrico simples, mas como um mosaico de unidades morfofuncionais com comportamentos distintos.

Nesse mosaico, grandes superfícies retilíneo-planares e divergentes atuam como áreas de dissipação e amortecimento da energia hidrossedimentar, enquanto setores dominados por formas convergentes funcionam como zonas preferenciais de concentração de fluxos e de amplificação das respostas geomorfológicas. Portanto, a forma das vertentes cumpre papel decisivo na leitura funcional da paisagem, ao ajudar a explicar por que determinadas porções da bacia (principalmente aquelas onde convergência topográfica e maiores declividades se sobrepõem) respondem de maneira muito mais sensível às intervenções humanas do que áreas submetidas a pressões aparentemente semelhantes.

O mapa de orientação das vertentes (**Figura 36**) complementa as leituras anteriores de hipsometria, declividade e forma ao indicar para quais quadrantes cada encosta está voltada e, por conseguinte, como se distribuem, em escala de bacia, as condições de exposição à radiação solar e às chuvas dominantes. Embora esse parâmetro não constitua o principal controle da dinâmica geomorfológica na BHRP, ele atua como um modulador importante do funcionamento local das vertentes, agregando nuances à leitura da sensibilidade das unidades de paisagem.

A classificação adotada distingue oito classes principais de aspecto (norte, nordeste, leste, sudeste, sul, sudoeste, oeste e noroeste) além da classe de relevo plano, permitindo reconhecer padrões de orientação preferencial ao longo do alto, médio e baixo curso da bacia. O mapa mostra um padrão espacial heterogêneo, sem predominância absoluta de um único quadrante, resultado coerente com a dissecação relativamente complexa do relevo da BHRP.

Apesar dessa heterogeneidade, notam-se regularidades associadas à organização da rede de drenagem. Vertentes orientadas para os quadrantes norte–nordeste e sul–sudoeste aparecem recorrentemente ao longo dos vales principais, refletindo a orientação estrutural dos canais. No alto curso, onde o relevo é mais encaixado, esse padrão se expressa com mais clareza: pares de vertentes opostas apresentam orientações contrastantes, uma voltada para norte ou nordeste e outra para sul ou sudoeste, indicando diferenças sistemáticas nos regimes de insolação entre os



dois lados dos vales. No médio e no baixo curso, a maior presença de superfícies planas e colinas amplas atenua esse contraste, embora ainda se reconheçam faixas contínuas de vertentes voltadas para leste e sudeste acompanhando o canal principal e alguns tributários.

No contexto amazônico, marcado por baixa amplitude térmica anual, a orientação das vertentes não exerce o mesmo papel dominante observado em ambientes de latitudes médias. Ainda assim, ela atua como fator secundário de diferenciação microclimática, influenciando a distribuição da umidade superficial, a persistência da cobertura vegetal e a dinâmica dos horizontes orgânicos. Encostas menos expostas à insolação direta ao longo do dia, sobretudo aquelas que recebem radiação mais oblíqua durante a manhã ou a tarde, tendem a reter umidade por períodos mais longos, favorecendo microambientes ligeiramente mais úmidos e maior proteção do solo.

Em contraste, vertentes mais expostas à radiação solar, sobretudo quando combinadas com formas convergentes e declividades mais acentuadas, podem apresentar comportamento hidrológico mais instável. Nesses setores, alternam-se fases de secagem superficial mais intensa com episódios de rápida saturação durante chuvas concentradas, o que amplia a suscetibilidade à erosão linear, à instabilidade de taludes rasos e, em situações específicas, a movimentos de massa de pequena escala. Essas respostas não decorrem da orientação isoladamente, mas do acoplamento entre aspecto, forma da vertente, declividade e cobertura do solo.

Dessa maneira, o mapa de orientação das vertentes não redefine, por si só, os grandes padrões de funcionamento geomorfológico da BHRP, porém acrescenta uma camada fina de interpretação fundamental para compreender diferenças locais de resposta dentro de unidades morfoestruturais semelhantes. Ao apontar quais encostas se encontram sistematicamente mais ou menos expostas à radiação e à ação combinada das chuvas, ele ajuda a esclarecer por que setores com declividade e forma equivalentes podem responder de maneira distinta às mesmas intervenções humanas, cooperando para uma leitura mais refinada da sensibilidade diferenciada da paisagem ao longo da bacia.

4.2.2. Organização espacial e dinâmica da paisagem na BHRP

A leitura do uso e ocupação da terra na BHRP revela que a paisagem atual não pode ser compreendida como simples justaposição entre áreas “naturais” e áreas “humanas”. Oposto a isso, ela expressa um ambiente híbrido, resultante da interação contínua, como observado no

capítulo 2, entre processos geobiofísicos e decisões sociais historicamente situadas, nas quais infraestrutura, legislação, práticas produtivas e condicionantes geomorfológicos se entrelaçam de forma indissociável. Nessa perspectiva, a organização territorial da bacia materializa um verdadeiro metabolismo ecológico-social, no qual a ocupação humana não apenas se adapta ao relevo, mas o reconfigura funcionalmente, redistribuindo fluxos de energia, água e sedimentos.

Considerando a área total da bacia, observa-se que grande parte do território se encontra submetida a regimes institucionais distintos de controle e uso, enquanto as áreas diretamente urbanizadas se concentram de forma espacialmente seletiva. Do total da BHRP, cerca de 376,7 km², correspondentes a aproximadamente 54,2% da área, integram o território conhecido como Quadrado Maldito, sob administração militar. Essa unidade estende-se de forma contínua ao longo da margem esquerda do rio Puraquequara, abrangendo setores do alto, médio e baixo curso. Sua presença configura um elemento estruturador de primeira ordem na organização da bacia, funcionando como barreira física e institucional à expansão urbana e rural nessa margem. A própria calha do rio reforça essa assimetria, atuando como limite natural que, articulado ao controle territorial militar, contribui para a manutenção de um amplo contínuo espacial com baixa intensidade de ocupação direta (**Quadro 3**).

Quadro 3 - Distribuição das principais unidades territoriais na BHRP

Categoria territorial	Área (km²)	Percentual da bacia (%)	Observação espacial
Quadrado Maldito (área do Exército)	376,7	54,2	Margem esquerda, abrangendo alto, médio e baixo curso
Reserva Florestal Adolpho Ducke	43,5	6,3	Margem direita; ocorre no médio e baixo curso, com maior expressão no baixo médio; atua como barreira à expansão urbana
Área urbana de Manaus	72,5	10,4	Baixo curso, na margem direita, pressionando interfaces com a Ducke
Demais usos/coberturas da bacia	202,1	29,1	Mosaico de usos (inclui zonas rurais/ramais, vegetação secundária etc.)

Organização: o autor (2025)

Na margem direita, destaca-se a Reserva Florestal Adolpho Ducke, com cerca de 43,5 km², o que corresponde a cerca de 6,3% da área da bacia. A reserva distribui-se principalmente entre o baixo e o médio curso, com maior extensão neste último, onde exerce ação estratégica como limite direto à expansão da malha urbana de Manaus. Diferente do Quadrado Maldito (cuja influência se projeta longitudinalmente por toda a bacia) a Reserva Ducke atua como um núcleo florestal concentrado, cuja importância ultrapassa sua dimensão areal ao preservar um bloco contínuo de vegetação em setores de alta conectividade hidrológica e geomorfológica.

Trata-se, portanto, de um dispositivo territorial que interrompe de forma abrupta a progressão urbana, mas não elimina as pressões exercidas em seu entorno imediato.

As áreas urbanas ocupam cerca de 72,5 km², correspondendo a aproximadamente 10,4% da área total da BHRP, e reúnem-se quase exclusivamente no baixo curso, também na margem direita. Essa urbanização não se distribui de maneira homogênea, organizando-se ao longo de eixos viários estruturantes, entre os quais se destacam a Estrada do Brasileirinho e a Avenida do Puraquequara. Esses corredores articulam bairros consolidados, áreas de expansão recente e uma densa rede de ramais, promovendo a penetração progressiva da ocupação sobre setores anteriormente rurais ou florestais e ampliando a conectividade entre encostas, vales e a rede de drenagem.

No médio curso, o padrão de uso e ocupação toma caráter distinto. A urbanização estrita é menos expressiva, mas observa-se a presença disseminada de ramais associados a chácaras, áreas de lazer, balneários e usos agropecuários de pequena escala. Esses ramais têm origem predominantemente na rodovia AM-010, refletindo um padrão linear de penetração territorial, diferente daquele observado no baixo curso, onde os acessos se multiplicam a partir da própria malha urbana. Essa caracterização não é simplesmente descritiva: ela implica modos distintos de pressão sobre a paisagem, pois enquanto no baixo curso a ocupação tende a ser contínua e densa, no médio curso ela se manifesta de forma fragmentada, porém progressiva, ampliando a conectividade hidrossedimentar e reduzindo, de forma cumulativa, a eficácia de amortecimento do sistema.

O alto curso, por sua vez, apresenta baixos níveis de ocupação direta. No entanto, sua importância para o funcionamento da bacia é desproporcional à intensidade do uso, uma vez que concentra os setores de maior energia potencial e maior capacidade de geração de fluxos hidrossedimentares, cujos efeitos se propagam longitudinalmente para jusante. Assim, mesmo áreas formalmente protegidas participam do metabolismo da bacia, não como espaços isolados, mas como componentes ativos da dinâmica sistêmica.

Essa configuração territorial evidencia que a ocupação da BHRP não resulta apenas da proximidade com a área urbana de Manaus, mas da interação entre infraestrutura viária, limites institucionais, posição longitudinal na bacia e conectividade geomorfológica. A margem direita, sobretudo no baixo e médio curso, concentra os usos mais intensivos e diversificados, enquanto a margem esquerda permanece protegida, ainda que não totalmente imune a pressões indiretas.

Nesse contexto, a implantação do Rodoanel Metropolitano de Manaus, conhecido como *Rapidão*, introduz um novo vetor de reorganização territorial. Ao conectar diretamente a zona urbana de Manaus à rodovia AM-010 e à BR-174, essa infraestrutura não somente redefine padrões de mobilidade, mas reconfigura o metabolismo espacial da bacia, ao reduzir distâncias funcionais, acelerar fluxos e induzir novas frentes de ocupação ao longo de seu traçado. Longe de representar apenas uma obra de engenharia, o Rodoanel age como aparelho de acoplamento entre sistemas urbanos, rurais e naturais, potencializando pressões sobre setores já assinalados, no objetivo 1, por elevada compactação dos solos, baixa infiltração e aumento da resistência à penetração.

Os padrões de uso e ocupação observados fornecem o contexto espacial necessário para compreender os contrastes registrados nas propriedades físicas dos solos. Os resultados tratados no objetivo 1 não decorrem de perturbações pontuais ou aleatórias, mas expressam um processo cumulativo de reorganização das unidades de paisagem, no qual a distribuição das intervenções humanas se sobrepõe sistematicamente a setores com maior conectividade funcional e menor margem de tolerância geomorfológica. A sensibilidade crescente da paisagem na margem direita da BHRP emerge, assim, não como anomalia local, mas como manifestação concreta de um ambiente híbrido, no qual sociedade e natureza não se opõem, mas se coproduzem, a cada passo em descompasso entre os ritmos da geomorfologia e os tempos acelerados da produção do espaço.

A leitura do uso e ocupação da terra apresentada até aqui fornece um retrato consistente da organização territorial contemporânea da BHRP. No entanto, compreender a sensibilidade das unidades de paisagem exige ir além dessa fotografia do presente e incorporar a dimensão temporal da ocupação. Afinal, os padrões atuais de compactação do solo, restrição à infiltração e reorganização hidromecânica não se instauram de forma súbita, mas resultam de trajetórias cumulativas de uso, cujos efeitos se acumulam e se amplificam ao longo do tempo.

Nesse sentido, a análise comparativa do uso e ocupação da terra em diferentes momentos históricos constitui estratégia recorrente em estudos voltados à dinâmica ambiental e à avaliação da sensibilidade da paisagem, principalmente em bacias hidrográficas submetidas à expansão urbana e à intensificação de infraestruturas viárias. Trabalhos que adotam recortes temporais semelhantes demonstram que a direção, a velocidade e o padrão espacial da ocupação são tão relevantes quanto sua extensão absoluta, porque condicionam a como os impactos se propagam pelo sistema geomorfológico.

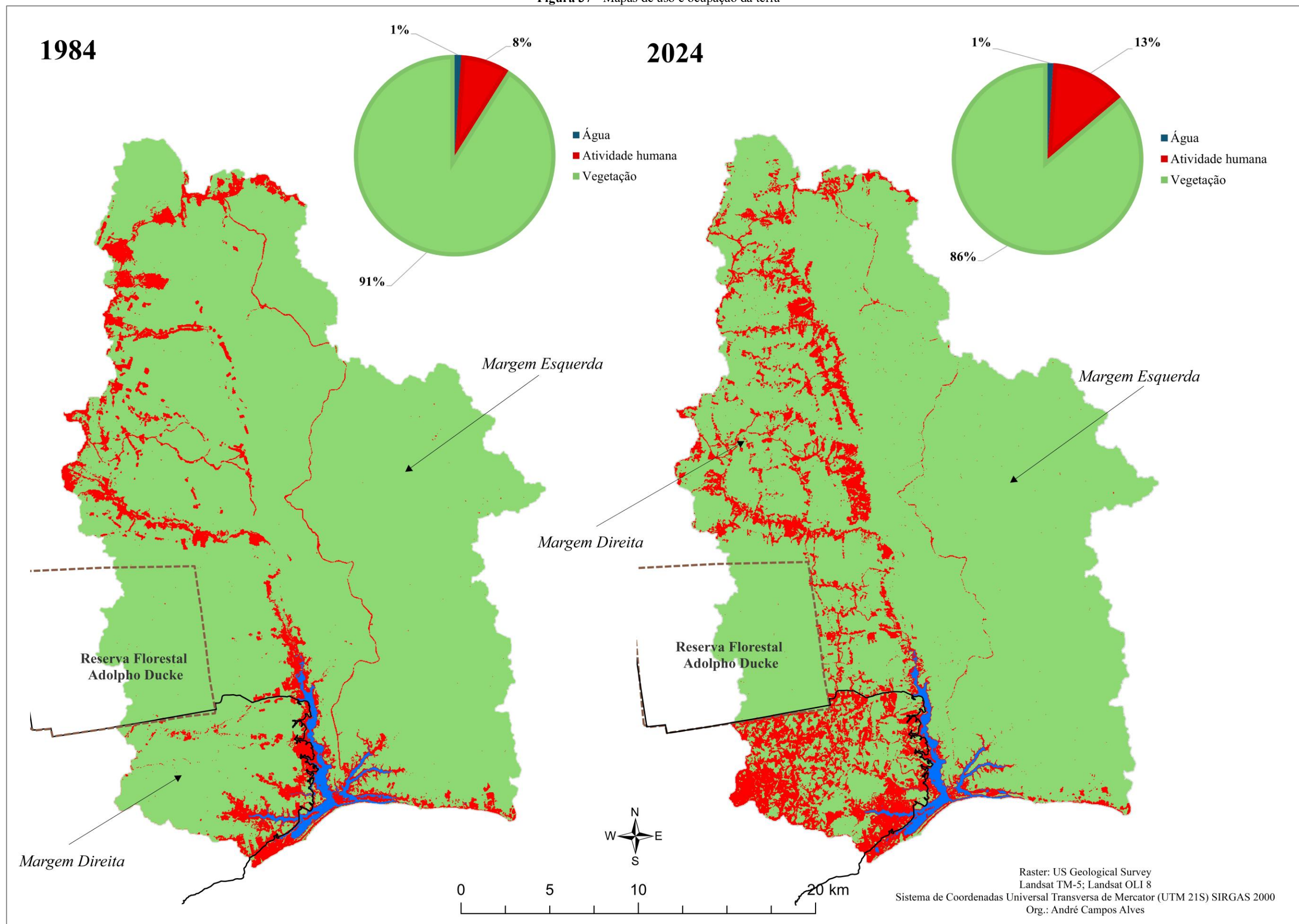
Assim, a comparação entre os mapas de uso e ocupação da terra de 1984 e 2024 não se limita a quantificar o avanço das áreas antropizadas na BHRP, mas busca identificar mudanças qualitativas no modo de funcionamento da paisagem, tais como a coalescência de manchas urbanas, o acréscimo da conectividade entre áreas ocupadas e a progressiva aproximação das atividades humanas de setores estruturalmente mais sensíveis. Essa abordagem temporal aceita reconhecer quando e onde determinados limiares passaram a ser tensionados, fornecendo a base necessária para compreender por que certas unidades de paisagem hoje operam em estados de elevada sensibilidade, enquanto outras mantêm maior capacidade de amortecimento.

4.2.3. Dinâmica temporal do uso e ocupação da terra (1984–2024)

A **Figura 37** evidencia que a principal transformação na BHRP não se resume ao aumento de áreas antrópicas, mas à mudança do modo de organização da unidade de paisagem: de uma matriz florestal relativamente contínua para um arranjo transicional, recortado por eixos de acesso e marcado por contatos frequentes entre fragmentos de vegetação, áreas abertas e a rede de drenagem. Embora a vegetação permaneça como classe dominante em toda a bacia, sua participação relativa diminui de 91% (1984) para 86% (2024), ao mesmo tempo em que a classe associada à atividade humana cresce de 8% para 13%, indicando que a mudança mais significativa é qualitativa e estrutural, um aumento de bordas, recortes e corredores, mais do que uma simples substituição total da matriz. A classe água mantém 1% nos dois recortes temporais, o que reforça que a reorganização observada no mapa está menos ligada a uma expansão expressiva de superfícies aquáticas mapeadas nessa escala e mais à reconfiguração do mosaico terrestre e de suas conexões internas.

No alto curso, a paisagem tende a preservar maior continuidade de vegetação, mantendo blocos mais extensos e uma malha antrópica relativamente menos densa quando comparada aos setores a jusante. Ainda assim, o padrão de linhas e pequenas aberturas indica que a unidade de paisagem já não pode ser tratada como “floresta contínua”: ela passa a incorporar descontinuidades que funcionam como portas de entrada para novos usos, redefinindo limites internos e ampliando o efeito de borda mesmo onde a matriz vegetal permanece dominante. Em termos geográficos, isso significa que o alto curso opera como área de maior capacidade de amortecimento, porém progressivamente mais permeável às pressões que se propagam ao longo da bacia por acessibilidade e por conexão hidrológica (**Figura 37**).

Figura 37 - Mapas de uso e ocupação da terra



Organização: o autor (2025)

No médio curso, o mapa sugere com mais nitidez a condição de zona de transição: a cobertura vegetal passa a coexistir com uma rede de intervenções que se ramifica e se interioriza, criando um mosaico no qual fragmentos, clareiras e corredores estruturam a paisagem. É nesse setor que a unidade de paisagem muda de caráter de forma mais legível no espaço: a vegetação deixa de ser um contínuo e passa a ser um conjunto de parcelas conectadas por faixas remanescentes, enquanto áreas alteradas se aproximam dos vales e multiplicam pontos de contato com a drenagem. O avanço geral da classe “atividade humana” para 13% em 2024 se materializa aqui como capilarização do acesso e maior densidade de recortes, convertendo o setor em uma unidade transicional mais sensível, na qual a transferência de energia e matéria tende a ocorrer de modo mais eficiente e menos amortecido.

No baixo curso, a reorganização é a mais intensa e territorialmente concreta: a ocupação se adensa e se torna mais contínua, especialmente nas proximidades da confluência/foz e nas áreas mais conectadas à malha urbana de Manaus, produzindo a maior fragmentação da matriz vegetal. Aqui, a unidade de paisagem deixa de ser interpretável como “várzea/terra firme com cobertura dominante” e passa a ser um sistema híbrido, onde áreas urbanizadas e infraestruturas articulam novas direções de expansão e reorganizam a conectividade interna da bacia. Nesse setor, o crescimento relativo da classe de atividade humana (de 8% para 13% no conjunto da bacia) se expressa como maior continuidade espacial das áreas alteradas e maior aproximação funcional da ocupação com a drenagem, ampliando bordas e potenciais rotas de escoamento concentrado e de aporte de sedimentos.

4.2.4. Unidades de paisagem e sensibilidade geomorfológica na BHRP

Ainda que a margem esquerda da BHRP apresente, em escala regional, alta continuidade da cobertura vegetal, os registros de campo indicam que mesmo setores submetidos a baixos níveis de intervenção direta podem ativar processos geomorfológicos intensos quando perturbações pontuais incidem sobre compartimentos morfoestruturais sensíveis; nesse contexto, a construção da via de acesso às Bases de Instrução na Selva do Exército Brasileiro constitui exemplo emblemático, pois a abertura da estrada em terrenos fortemente ondulados, distintos por elevada declividade e vertentes convergentes, favoreceu a canalização e a concentração do escoamento superficial, criando condições para o surgimento de feições erosivas como as voçorocas BI-2 (**Figura 38**) e BI-3 (**Figura 39**), localizadas na margem esquerda da bacia.

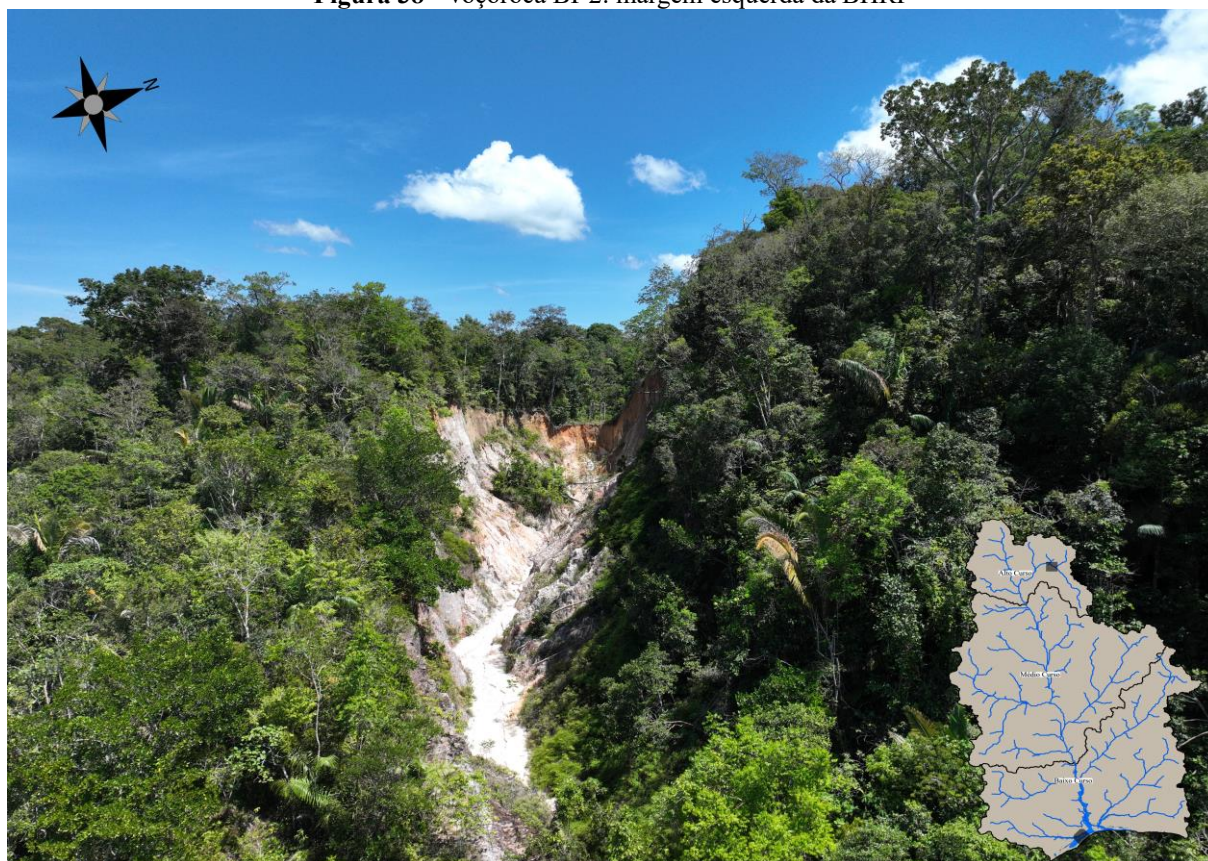
Figura 38 - Voçoroca BI-2: margem esquerda da BHRP

Foto: DJI Phantom 4 Pro. **Piloto:** Antonio Fábio Sabbá Guimarães Vieira (19/08/2025)

Do ponto de vista morfológico, as áreas onde se inserem BI-2 e BI-3 correspondem a terrenos fortemente ondulados, com declividades elevadas e vertentes de geometria convergente, condição que favorece a concentração de fluxos e o aumento do poder erosivo quando há canalização do escoamento. A presença de cobertura florestal densa no entorno, contrastando com o corredor exposto, reforça a leitura de que a instabilização decorre de uma ruptura localizada da proteção superficial e do redirecionamento de fluxos para trajetórias mais concentradas.

No caso da BI-2 (**Figura 38**), o gatilho principal relaciona-se à abertura da estrada de acesso, que atua como superfície compactada e como eixo artificial de convergência do escoamento. Ao interceptar trajetórias naturais de fluxo e impor caminhos preferenciais, a intervenção promoveu o redirecionamento do escoamento superficial para setores rebaixados da encosta, elevando a descarga concentrada e reduzindo a dissipação lateral da energia. Nessa feição, os fluxos passam a ser captados a partir de platôs situados em torno de 137 m e conduzidos para setores rebaixados próximos de 92 m, estabelecendo gradiente altimétrico expressivo ao longo de curta distância e intensificando a capacidade de incisão. Em termos processuais, esse rebaixamento forçado concentra energia hídrica em um ponto de descarga da encosta,

favorecendo aprofundamento do canal erosivo, alargamento progressivo por instabilização de bordas e recuo de cabeceira, características típicas de voçorocamento.

A BI-3 (**Figura 39**) apresenta uma cicatriz erosiva ampla em encosta, marcada por abertura abrupta no contínuo florestal e pela exposição de material claro ao longo de uma face íngreme, indicando incisão linear avançada e remoção significativa de material superficial. A geometria da feição sugere um setor de cabeceira com tendência à concavidade tipo anfiteatro, compatível com áreas de convergência de fluxos onde o escoamento superficial se concentra e aumenta a energia disponível para aprofundamento e alargamento do canal erosivo. O contraste entre as vertentes adjacentes sob cobertura arbórea e o interior exposto da feição evidencia o papel da ruptura local da cobertura/estrutura superficial na ativação do processo, favorecendo recuo regressivo de cabeceira e instabilização das bordas com desbarrancamentos sucessivos. Assim, a BI-3 não deve ser interpretada apenas como “área degradada”, mas como elemento que reorganiza a conectividade hidrossedimentar da unidade de paisagem, ao capturar e canalizar fluxos e transferir rapidamente energia e sedimentos da encosta para setores rebaixados e, potencialmente, para a rede de drenagem.

Figura 39 - Voçoroca BI-3: margem esquerda da BHRP

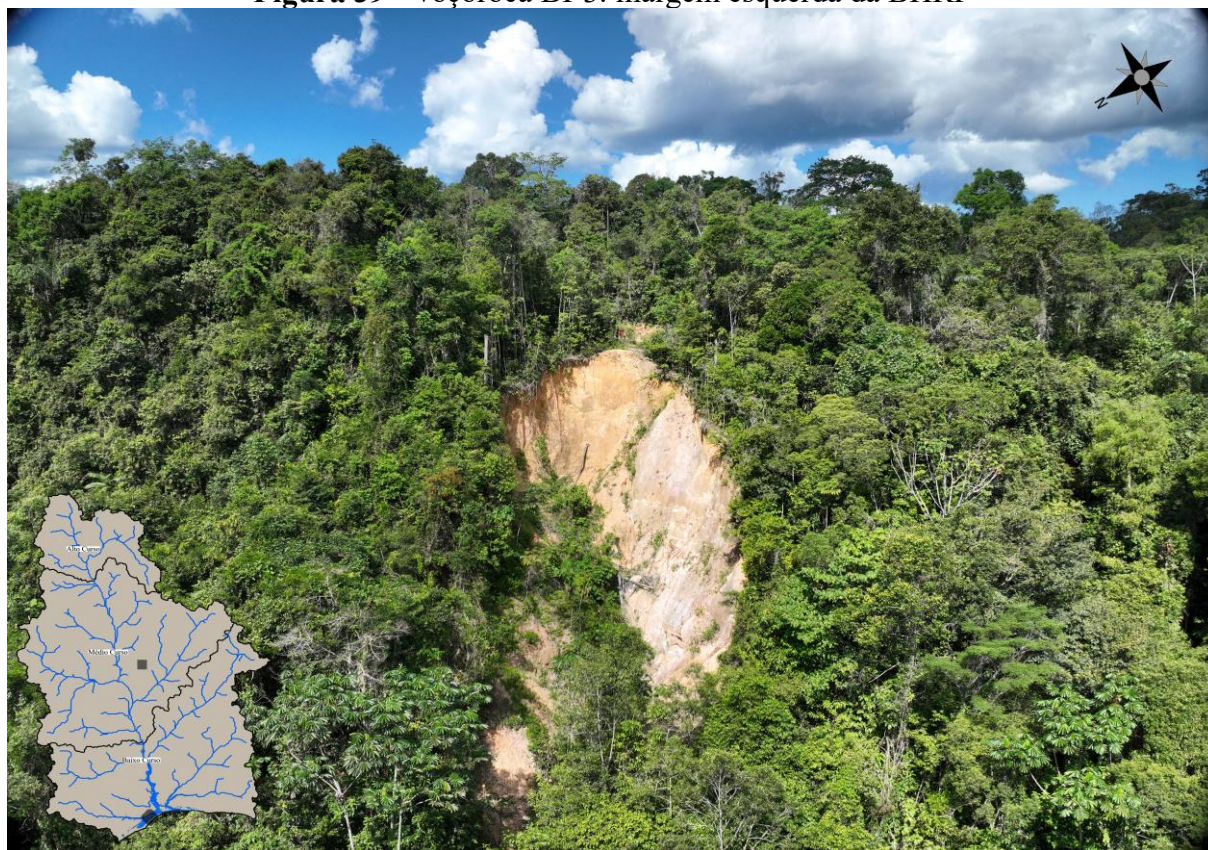


Foto: DJI Phantom 4 Pro. **Piloto:** Antonio Fábio Sabbá Guimarães Vieira (19/08/2025)

Em ambos os casos, a reorganização dos fluxos induzida pela intervenção sobre a vertente elevou a energia específica do escoamento em pontos localizados, superando limiares de estabilidade geomorfológica e permitindo a transição de processos difusos (erosão laminar e em sulcos) para erosão linear profundamente incisiva (voçoroca). Desse modo, BI-2 e BI-3 materializam a sensibilidade geomorfológica da margem esquerda, onde a interação entre relevo, forma de vertente e intervenção viária tende a acelerar a conectividade encosta–canal e a exportação de sedimentos ao sistema de drenagem.

Como destacam Brunsden e Thornes (1979), em sistemas geomorfológicos altamente sensíveis, estresses de pequena escala são capazes de desencadear respostas intensas, sobretudo quando os limiares de estabilidade são deslocados. No caso das voçorocas BI-2 e BI-3, observa-se que a intensidade da resposta não está relacionada ao volume de tráfego ou ao uso contínuo da via (uma vez que se trata de estrada de acesso restrito), mas sim à compatibilidade negativa entre a intervenção realizada e o arranjo morfoestrutural do terreno. Esse aspecto diferencia essas feições daquelas associadas a rodovias de maior circulação, frequentemente discutidas na literatura especializada (Silva, 2021; Carvalho, 2017; Dirane, 2016), reforçando o papel central dos condicionantes geomorfológicos.

Visto que as voçorocas se conectam diretamente à rede de drenagem, seus efeitos dinâmicos extrapolam a escala local e assumem comportamento sistêmico **Figura 40A**, a cicatriz erosiva exposta na encosta se articula a um corredor de escoamento que converge para o fundo de vale, criando uma via preferencial de exportação de sedimentos para o canal. A jusante, esse acoplamento vertente–canal se materializa na **Figura 40B** pela presença de uma faixa contínua de água turva e de depósitos claros alinhados ao talvegue, compondo um rastro sedimentar que acompanha o curso d'água e torna visualmente evidente a propagação longitudinal do impacto por mais de um quilômetro. Tal 'doença sistêmica' expressa a alta conectividade hidrossedimentar entre as unidades de paisagem, consolidando a leitura da bacia como um sistema integrado no qual impactos localizados geram consequências em múltiplas escalas.

Figura 40 - Extensão da área de contribuição das Voçorocas A) BI-2 e B) BI3.



Foto: DJI Phantom 4 Pro. **Piloto:** Antonio Fábio Sabbá Guimarães Vieira (19/08/2025)

As voçorocas configuram-se como as feições erosivas mais expressivas da paisagem, representando respostas rápidas e duradouras às perturbações antrópicas. Conforme definição clássica, trata-se de formas com fundo plano, seção transversal em “U” e profundidade superior

a 1,5 m (Vieira, 1998), cuja gênese pode ser natural, mas cuja evolução é fortemente acelerada pela ação humana principalmente pela remoção da cobertura vegetal. Na BHRP, essas feições constituem indicadores inequívocos de elevada sensibilidade e baixa resiliência das unidades de paisagem afetadas

Essas observações de microescala permitem avançar na identificação e na interpretação das unidades de paisagem da BHRP, distinguindo aquelas de caráter mais estável, aqui chamadas unidades fixas, daquelas cuja realidade e funcionalidade dependem da sazonalidade hidrológica e dos ciclos fluviais, as unidades móveis.

Entre as unidades de paisagem fixas, destaca-se a Vila do Puraquequara, que reflete a qualidade periurbana típica das margens do rio homônimo (**Figura 41**). Caracterizada pela presença de equipamentos urbanos e por uma dinâmica social híbrida, a vila configura-se como zona de transição entre o modo de vida ribeirinho e a lógica urbana da metrópole manauara. Trata-se de um espaço onde diferentes temporalidades e ritmos de vida coexistem, revelando a paisagem como produto histórico e socialmente construído.

Figura 41 - Vista panorâmica da Vila do Puraquequara



Foto: DJI Phantom 4 Pro. **Piloto:** Antonio Fábio Sabbá Guimarães Vieira (19/08/2025). **Org.:** o autor (2026).

A ocorrência de voçorocas efêmeras (**Figura 42**) reforça que a sensibilidade geomorfológica não se restringe a áreas intensamente urbanizadas ou submetidas a uso contínuo: mesmo ações pontuais, quando implantadas em unidades de paisagem com alta conectividade funcional e baixa margem de tolerância geomorfológica, podem desencadear respostas rápidas e duradouras. Em contraponto, as planícies fluviais constituem outra unidade fixa relevante na bacia, comuns na Amazônia em função da densa rede de drenagem e caracterizadas por relevo pouco dissecado e forte controle hidrológico. No rio Puraquequara, apesar da sazonalidade hídrica, com exposição durante a vazante e inundação na cheia, essas planícies apresentam relativa estabilidade morfológica quando comparadas a rios de maior carga sedimentar, de modo que os processos erosivos tendem a ocorrer de forma pontual e de pequena magnitude, evidenciando a resiliência do sistema frente às variações cíclicas impostas pelo regime fluvial.

Figura 42 - Voçorocas efêmeras (surgem na vazante do rio)



Foto: Gabriela Mendonça da Silva (2024)

As unidades de paisagem móveis expressam de forma mais evidente a dinâmica sazonal do sistema fluvial. Evidenciam-se os campos hidromórficos e as restingas efêmeras, que emergem durante a estação seca e desaparecem na cheia (**Figura 43**). Essas unidades reconfiguram temporariamente o espaço de circulação das comunidades urbano-ribeirinhas, alternando o uso de embarcações e caminhos terrestres conforme o nível do rio.

Figura 43 - Unidades da paisagem móveis: restingas efêmeras



Foto: DJI Phantom 4 Pro. **Piloto:** Antonio Fábio Sabbá Guimarães Vieira (19/08/2025). **Org.:** o autor (2026).

As ilhas efêmeras (**Figura 44**), formadas pelo acúmulo sazonal de sedimentos no leito do canal, constituem uma das expressões mais dinâmicas dessa categoria. Sua presença confere ao rio Puraquequara um padrão entrelaçado, com múltiplos canais que se subdividem em função dessas feições temporárias.

Figura 44 - Unidades de paisagem móveis: ilhas efêmeras



Foto: Gabriela Mendonça da Silva (2024)

É nesse momento que o canal principal deixa, durante o período de seca, de ter o padrão retilíneo (**Figura 45**). Além de seu papel geomorfológico, essas ilhas funcionam como refúgios ecológicos durante os períodos de seca extrema, reforçando a complexidade funcional da paisagem fluvial

Outras unidades móveis incluem os canais de estiagem, que mantêm atividade mesmo sob baixos volumes de água, e as praias fluviais, típicas de rios de água preta, associadas a Neossolos Flúvicos e Quartzarênicos (Teixeira *et al.*, 2009), além de Gleissolos em áreas de saturação hídrica prolongada. Essas feições evidenciam que a paisagem da BHRP não é estática, mas responde continuamente às variações hidrológicas, climáticas e antrópicas.

Figura 45 - Trecho do rio Puraquequara, na região de várzea amazônica, ilustrando as variações sazonais entre os períodos de cheia e seca

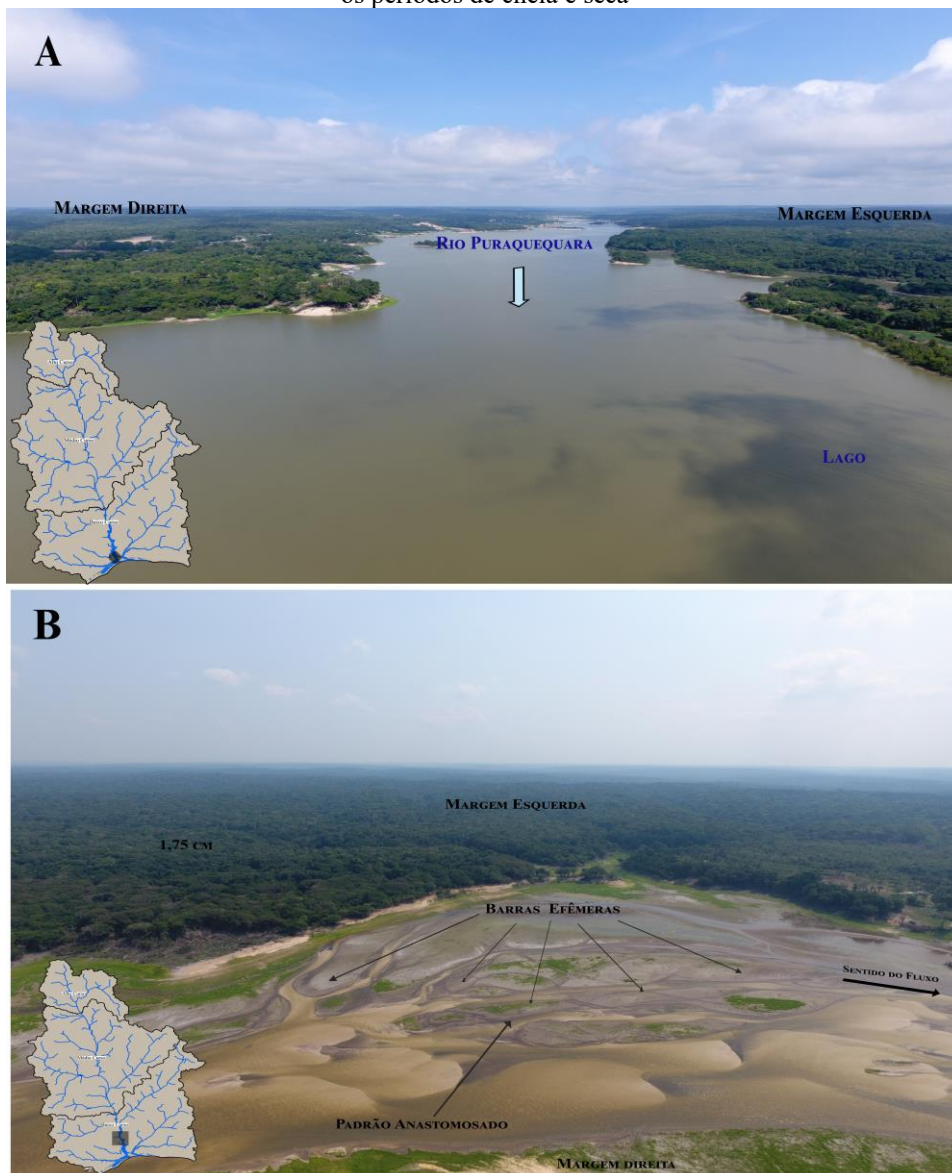


Foto: DJI Phantom 4 Pro. **Piloto:** Antonio Fábio Sabbá Guimarães Vieira

Em síntese, a leitura integrada dessas unidades de paisagem confirma que a BHRP opera como um sistema sensível, no qual a interação entre morfologia, hidrologia, uso da terra e temporalidade fluvial define a magnitude e a irreversibilidade das respostas geomorfológicas. Essa constatação encerra o objetivo 2 ao demonstrar, de forma empírica e multiescalar, que a sensibilidade da paisagem resulta da sobreposição entre arranjos físicos específicos e modos diferenciados de ação humana.

4.3.INTERPRETAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL E DA CONFIGURAÇÃO DAS ÁREAS DE DIFERENTES NÍVEIS DE SENSITIVIDADE DA PAISAGEM NA BHRP

Este objetivo teve êxito quando se realizou a comparação entre dois cenários analíticos complementares: um baseado exclusivamente nos condicionantes naturais da bacia, derivados dos parâmetros morfométricos, e outro que incorpora as condições contemporâneas de uso e ocupação da terra. Essa estratégia aceita distinguir o potencial funcional intrínseco da paisagem de sua resposta efetiva diante das perturbações humanas, provando não apenas onde a paisagem é mais sensível, mas porque e em que condições essa sensibilidade se manifesta.

O mapa de sensibilidade geomorfológica baseado apenas em fatores naturais mostra que a resposta potencial da paisagem é fortemente controlada pela organização da rede de drenagem e pela conectividade geomorfológica. As classes de maior sensibilidade alinham-se aos eixos principais de drenagem, às zonas de convergência de fluxos e aos setores com maior área de contribuição, refletindo a eficiência estrutural do sistema em concentrar, transferir e redistribuir energia e sedimentos (**Figura 46**). Sob essa ideia, a paisagem assemelha-se a um organismo cujos “vasos condutores” (canais e vales) organizam a circulação interna, regulando os fluxos e definindo os pontos de maior reatividade funcional.

Nesse cenário, predomina a classe de sensibilidade moderada, o que caracteriza uma paisagem amplamente funcional, dotada de mecanismos simultâneos de concentração e dissipação de energia. Não se trata de um estado de inércia ou de resistência absoluta, mas de um equilíbrio dinâmico em que a paisagem responde aos estímulos de forma proporcional, reorganizando-se sem colapsar. Essa sensibilidade intermediária indica capacidade de resposta compatível com a dinâmica hidrológica e geomorfológica da bacia.

As áreas de alta sensibilidade natural, embora espacialmente mais restritas, cumprem papel estratégico na dinâmica da BHRP. Correspondem a setores em que a conectividade geomorfológica é alta e os limiares de resposta são mais facilmente mobilizados, funcionando como verdadeiras regiões sensoriais do sistema: áreas altamente responsivas, capazes de reagir rapidamente às variações do regime hidrossedimentológico. É nesse contexto que se estabelece a relação com as unidades de paisagem efêmeras (planícies de inundação recentes, barras, margens ativas e canais secundários), majoritariamente inseridas nessas classes de maior sensibilidade.

Essas unidades não devem ser entendidas como áreas “instáveis” no sentido pejorativo, todavia como componentes essenciais do funcionamento fluvial. Sua elevada sensibilidade expressa, antes de tudo, a capacidade adaptativa do sistema, permitindo ajustes rápidos às oscilações de vazão e de carga de sedimentos. Tal como tecidos biologicamente ativos, essas unidades absorvem, redistribuem e transformam energia, garantindo a continuidade funcional do sistema, ainda que à custa de mudanças morfológicas frequentes.

As áreas classificadas como de baixa sensibilidade distribuem-se de forma mais pontual e espaçada, associadas principalmente a divisores topográficos, superfícies mais planas e setores com menor organização do escoamento. Podem ser comparadas a estruturas de sustentação do organismo, responsáveis por amortecer impactos e garantir estabilidade estrutural. Nesses trechos, a paisagem apresenta maior capacidade de dissipação de energia, resultando em ajustes geomorfológicos mais lentos, graduais e pouco perceptíveis à escala do observador.

Quando as condições atuais de uso e ocupação são incorporadas ao modelo, esse arranjo espacial se altera de maneira substantiva. O mapa que considera os fatores humanos revela uma expansão significativa das classes de alta e muito alta sensibilidade, sobretudo em áreas situadas fora dos principais eixos naturais de drenagem, encostas de gradiente intermediário, setores de transição morfológica e áreas sob maior intensidade de intervenção humanas (**Figura 47**). Esse padrão indica que a ação humana atua como agente de desregulação funcional, ativando respostas intensas em setores que, sob uma perspectiva estritamente morfométrica, tenderiam a um comportamento mais moderado.

Nesse sentido, o uso da terra não cria a sensibilidade do nada, mas reprograma sua distribuição, deslocando os focos de maior resposta geomorfológica para áreas estruturalmente menos preparadas para absorver perturbações. Observa-se uma redução relativa das áreas de baixa sensibilidade e a expansão de zonas funcionalmente mais reativas, sobretudo na margem direita, onde se concentram urbanização, infraestrutura viária e usos periurbanos.

A concentração de áreas de alta sensibilidade na margem direita não é artefato metodológico, mas expressão da distribuição desigual das pressões humanas sobre a bacia. A margem esquerda, protegida institucionalmente administração militar, mantém cobertura vegetal contínua e infraestrutura limitada. Isso resulta em intervenções humanas menos intensas e, portanto, em menor alteração dos padrões naturais de sensibilidade. A assimetria entre as margens revela que a margem esquerda preserva predominantemente mecanismos naturais de amortecimento, a margem direita tornou-se um espaço onde a interação entre predisposições geomorfológicas e pressões humanas intensas reorganiza continuamente a capacidade de resposta do sistema.

Essa reorganização pode ser comparada a um organismo submetido a estímulos externos persistentes: sistemas originalmente estáveis passam a operar próximos de seus limiares de tolerância, encurtando os tempos de resposta e reduzindo a capacidade de amortecimento. A sensibilidade hoje observada na BHRP emerge, assim, da superposição entre o potencial natural da paisagem e as formas contemporâneas de apropriação do território.

Por fim, é importante enfatizar que os mapas produzidos não representam cenários de risco nem indicam, de forma direta, a ocorrência de processos específicos. Eles expressam a sensibilidade geomorfológica da paisagem sob diferentes condições de organização sistêmica, funcionando como um diagnóstico funcional do território. Tal como em um exame clínico, não apontam necessariamente a doença, mas revelam os sistemas mais reativos, os pontos de maior esforço funcional e os setores em que pequenas perturbações tendem a gerar respostas desproporcionais. Essa leitura integrada consolida a articulação entre morfometria, uso da terra e unidades de paisagem, oferecendo uma chave interpretativa robusta para compreender a dinâmica geomorfológica e a elevação progressiva da sensibilidade na BHRP, conforme pode ser observado no quadro síntese (**Quadro 4**).

Quadro 4 - Síntese das unidades de paisagem analisadas

Unidade de paisagem	Descrição curta	Transição observada 1984→2024	Agentes Pressões	Indicador de sensibilidade	Grau de sensibilidade	Exemplo visual
Várzea Planície de Inun- dação	Superfície sazonalmente alagável; sedimentos finos; vegetação hidró- fila	Redução da continuidade vege- tal; maior ocupação pontual; maior integração funcional com áreas urbanas	Expansão urbana; aterros; obras de infraestrutura	% de cobertura vegetal perdida; área ocupada (ha)	Alta	
Restingas efêmeras	Bancos arenosos temporários for- mados por deposição fluvial	Alteração na frequência e exten- são de formação; redução local	Alteração de fluxo; dragagem; assoreamento	Frequência de aparecimento; área média por evento	Média	
Ilhas efêmeras	Ilhas de sedimento sazonalmente expostas	Fragmentação espacial; desloca- mento de posição	Alteração de sedimentos por obras; variações hidrológicas	Persistência temporal; número de ilhas por trecho	Média	
Encostas convergentes ín- gremes	Alta declividade; alta conectivi- dade hidrossedimentar	Aumento de processos concen- trados de erosão; surgimento de voçorocas	Desmatamento; abertura de ra- mais; compactação	Área de voçorocas; avanço anual (m/ano)	Muito alta	

Unidade de paisagem	Descrição curta	Transição observada 1984→2024	Agentes Pressões	Indicador de sensibilidade	Grau de sensibilidade	Exemplo visual
Encostas divergentes su- perfícies de baixa declivi- dade	Superfícies mais planas; menor co- nectividade	Perda gradual de cobertura; fra- gmentação interna	Conversão para uso rural; pe- quenas vias	Taxa de infiltração média; % de cobertura contínua	Média	
Voçorocas Ravinas	Erosão concentrada em canais se- cundários	Ampliação da área de contribui- ção; aumento da severidade	Remoção de cobertura; tráfego pesado; drenagem inadequada	Área afetada (ha); taxa de avanço	Muito alta	
Terraços fluviais bancos consolidados	Superfícies elevadas relativamente estáveis	Corte pontual por obras; redu- ção de extensão contínua	Extração; obras de infraestru- tura	Alteração do perfil longitudinal; perda de área	Média	
Áreas urbanas consolida- das e expansão	Uso impermeável; infraestrutura densa	Expansão para margens médias e baixas; aumento de impermea- bilização	Loteamentos; vias; Distrito In- dustrial	% de impermeabilização; índice de compactação do solo	Muito alta	

Unidade de paisagem	Descrição curta	Transição observada 1984→2024	Agentes Pressões	Indicador de sensibilidade	Grau de sensibilidade	Exemplo visual
Ramais e vias não pavimentados	Corredores lineares de acesso	Abertura e densificação; maior penetração em encostas	Acesso rural/urbano; exploração de lotes	Densidade de ramais (km/km²); conexão com áreas erodidas	Alta	
Matas contínuas remanescentes	Cobertura florestal densa e contínua	Fragmentação e redução de área; ilhamento	Corte seletivo; conversão para pastagem	Índice de fragmentação; área remanescente (ha)	Baixa	
Mosaicos agropecuários capoeiras	Áreas de uso intermitente; regeneração secundária	Aumento da heterogeneidade; alternância uso/descanso	Pequena agricultura; queimadas	% de área em uso; porosidade do solo	Média	
Áreas de deposição ativa pontos de acúmulo	Locais de sedimentação em vales e meandros	Redistribuição espacial; alteração de volume de sedimento	Alterações de fluxo; obras a montante	Variação de batimetria; taxa de acúmulo (m³/ano)	Alta	

CONSIDERAÇÕES FINAIS

1. *A paisagem da Bacia Hidrográfica do Rio Puraquequara confirma-se como um sistema naturalmente complexo, cuja organização física estabelece uma base estrutural robusta, porém intrinsecamente desigual em termos de resposta geomorfológica.* A análise integrada dos compartimentos morfométricos, pedológicos e hidrológicos demonstrou que a bacia não constitui um espaço homogêneo, mas um conjunto articulado de unidades de paisagem com diferentes capacidades de dissipação, transferência e concentração de energia. A hipsometria, a declividade, a forma e a orientação das vertentes revelaram uma hierarquia funcional clara entre alto, médio e baixo curso, na qual a energia potencial e a conectividade geomorfológica organizam, desde a origem, os padrões de sensibilidade. Essa constatação reforça que a sensibilidade não emerge do acaso nem apenas da ação humana, mas é uma propriedade latente da própria arquitetura da paisagem.

2. *As propriedades físicas dos solos atuam como mediadoras fundamentais entre a estrutura do relevo e a resposta geomorfológica da paisagem.* Os resultados obtidos no Objetivo 1 evidenciaram contrastes consistentes entre margens, posições topográficas e unidades de paisagem, especialmente no que se refere à granulometria, à infiltração e à resistência à penetração. Solos mais compactados, com menor capacidade infiltrativa e maior resistência mecânica, mostraram-se associados a respostas mais rápidas e menos amortecidas frente aos estímulos externos. Esses atributos não apenas refletem o histórico de uso da terra, mas também condicionam o modo como a paisagem absorve, redistribui ou amplifica as perturbações, funcionando como o “tecido conjuntivo” do sistema geomorfológico.

3. *A intervenção humana não cria a sensibilidade da paisagem, mas redefine sua distribuição espacial, intensificando setores previamente predispostos.* A comparação entre os mapas de sensibilidade baseados exclusivamente em fatores naturais e aqueles que incorporam o uso e a ocupação da terra demonstrou que a ação antrópica atua como um modulador da resposta geomorfológica. Áreas que, sob uma leitura estritamente morfométrica, apresentariam sensibilidade média passaram a integrar classes de alta sensibilidade quando sobrepostas à urbanização, à abertura de ramais e à implantação de infraestruturas viárias. Esse resultado confirma a tese central do trabalho: a sensibilidade observada na BHRP é produto da superposição entre potencial natural e intervenção humana, e não de um ou outro fator isoladamente.

4. *A margem direita da bacia configura-se como o principal espaço de amplificação da sensibilidade geomorfológica contemporânea.* A concentração da urbanização no baixo curso,

a presença da Reserva Florestal Adolpho Ducke como limite físico-institucional e a expansão de usos periurbanos no médio curso, associados aos ramais derivados da AM-010, criaram um mosaico altamente fragmentado. Nesse setor, a combinação entre declividades intermediárias, formas de vertentes convergentes e alterações na cobertura do solo reduziu a capacidade de amortecimento do sistema, encurtando os tempos de resposta e ampliando a conectividade hidrossedimentar. A paisagem, nesse trecho, comporta-se como um organismo submetido a estímulos recorrentes, com respostas cada vez menos graduais.

5. A margem esquerda, embora institucionalmente protegida, não se mostra imune aos efeitos indiretos da reorganização territorial da bacia. A análise das voçorocas associadas às bases de instrução militar revelou que mesmo intervenções pontuais, quando realizadas sobre terrenos fortemente ondulados e conectados, são suficientes para ultrapassar limiares de estabilidade. A presença dessas feições erosivas demonstra que a proteção legal não elimina a sensibilidade intrínseca do sistema. Ao contrário, evidencia que a paisagem responde prioritariamente à sua configuração morfofuncional, independentemente da intensidade aparente do uso, reforçando a noção de que a sensibilidade é uma propriedade sistêmica e não apenas um reflexo do grau de ocupação.

6. As unidades de paisagem identificadas operam como módulos funcionais com comportamentos contrastantes frente às perturbações. A distinção entre unidades fixas e móveis, permanentes e efêmeras, permitiu compreender que a paisagem da BHRP não responde de maneira uniforme às mudanças. Planícies fluviais consolidadas, ilhas fixas e superfícies retilíneo-planares funcionam como áreas de amortecimento relativo, enquanto unidades efêmeras (como restingas sazonais, canais de estiagem e ilhas temporárias) atuam como zonas de resposta rápida, altamente adaptativas. Essa diferenciação demonstra que alta sensibilidade não deve ser confundida com instabilidade patológica, mas interpretada como capacidade de ajuste dinâmico do sistema.

7. A dinâmica temporal do uso e ocupação da terra entre 1984 e 2024 evidencia uma transição de um sistema mais contínuo para outro funcionalmente fragmentado. A redução sistemática das médias e medianas dos padrões de reflectância espectral, associada ao aumento da heterogeneidade interna, indica a perda da dominância da cobertura vegetal contínua e a ampliação do mosaico de usos. Esse processo não ocorreu de forma homogênea, sendo mais intenso no baixo e médio curso, onde a conectividade entre unidades de paisagem foi ampliada por vias, ramais e ocupações difusas. O resultado é uma paisagem mais sensível, menos resiliente e mais propensa a respostas rápidas frente a eventos hidrológicos extremos.

8. *A sensibilidade da paisagem da BHRP pode ser compreendida como um estado fisiológico do sistema, e não como uma condição estática ou exclusivamente negativa.* Assim como um organismo vivo, a bacia apresenta setores mais resistentes, outros mais responsivos e alguns próximos a limiares críticos. A sensibilidade elevada indica maior capacidade de resposta e adaptação, mas também menor margem de erro frente às intervenções. Essa leitura afasta interpretações simplistas baseadas em risco ou degradação isolada, permitindo compreender a paisagem como um sistema em constante ajuste, no qual estabilidade e mudança coexistem.

9. *A tese proposta foi confirmada: as unidades de paisagem da Bacia do Puraquequara apresentam diferentes níveis de sensibilidade, condicionados pela resistência dos solos, pela intensidade das intervenções humanas e pela sazonalidade fluvial.* Os resultados demonstram que nenhuma dessas variáveis atua de forma isolada. É a interação entre elas (mediada pela conectividade geomorfológica) que define o comportamento da paisagem. A sazonalidade fluvial, em particular, funciona como um teste cíclico de estresse, revelando, a cada cheia e vazante, os limites e as capacidades adaptativas das diferentes unidades.

10. *Este trabalho reafirma a importância de abordagens integradas e sistêmicas na análise da paisagem amazônica contemporânea.* A BHRP não deve ser lida apenas como uma bacia sob pressão urbana, nem como um espaço natural residual, mas como um sistema híbrido, no qual natureza e sociedade se entrelaçam de forma indissociável. Compreender sua sensibilidade não é apenas um exercício acadêmico, mas um passo fundamental para orientar práticas de planejamento, conservação e manejo que reconheçam a complexidade, respeitem os limiares do sistema e evitem transformar respostas naturais em crises geomorfológicas irreversíveis.

REFERÊNCIAS

- ADAMI, M.; ALCÂNTARA, E. H.; FREITAS, R. M.; OLIVEIRA, C. G.; SOUZA, A. F.; STECH, J. L.; MOREIRA, M. A.; RUDORFF, B. F. T. Metodologia para delimitação da bacia hidrográfica de reservatórios hidrelétricos: aplicação ao reservatório de Itumbiara. (GO). In: Anais do XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2011, Curitiba. **Anais eletrônicos...** São José dos Campos, INPE, 2011. Disponível em: <http://mar.te.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/marte/2011/07.22.17.43/doc/p1373.pdf>. Acesso em: 07 set. 2024.
- ALMEIDA, R. B. de; ALEIXO, N. C. R. Espacialização da incidência de malária e indicadores de vulnerabilidade socioambiental em Manaus, Amazonas, Brasil. **Hygeia - Revista Brasileira de Geografia Médica e da Saúde**, Uberlândia, p. e73362, 2024. DOI: 10.14393/Hygeia73362. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/hygeia/article/view/73362>. Acesso em: 31 out. 2025.
- ALVES SOBRINHO, T.; OLIVEIRA, P. T. S.; RODRIGUES, D. B. B.; AYRES, F. M. Delimitação automática de bacias hidrográficas utilizando dados SRTM. **Engenharia Agrícola**, v. 30, p. 46–57, fev. 2010. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162010000100005>.
- ALVES, A. C.; FREITAS, I. S. de; SANTOS, M. Q dos. Análise multitemporal da expansão urbana da cidade de Manaus, Amazonas, utilizando imagens de satélite. **Geosaberes: Revista de Estudos Geoeducacionais**, v. 11, n. 1, p. 305-317, 2020. ISSN: 2178-0463. Disponível em: <https://www.redalyc.org/journal/5528/552861694029/html/>. Acesso em: 10 jun. 2022.
- ANDRADE, R. F. C. **Ribeirinhos urbanos: vidas e modos de vida no Puraquequara**. Manaus: EDUA, 2013.
- ANDRADE, R. F. C.; FERRAZ, L. R. O lugar onde o poraquê quara: breve histórico do bairro Puraquequara. In: RUBIM, M. A. L.; FERRAZ, L. R. (Org.). **Puraquequara em mosaico** [recurso eletrônico]: histórias, vidas e recursos naturais. Manaus: FUA, 2020. p. 15-40. Disponível em: https://riu.ufam.edu.br/bitstream/prefix/5853/5/Ebook_PuraquequaraemMosaico.pdf. Acesso em: 31 out. 2025.
- ANDRADE, S. J.; ALEIXO, N. C. R. Análise dos anos-padrão de chuvas em Manaus-AM. In: PINHEIRO, L. S.; GORAYEB, A. (Org.). **Geografia física e as mudanças globais**. Fortaleza: Editora UFC, 2019. v. 1, p. 1–1327.
- ARAÚJO, E. S. Desenvolvimento urbano local: o caso da Zona Franca de Manaus. **Revista Brasileira de Gestão Urbana, [S. l.]**, v. 1, n. 1, p. 33–42, 2017. Disponível em: <https://periodicos.pucpr.br/Urbe/article/view/4255>. Acesso em: 29 jul. 2024.
- ARQUIVO ICONOGRAFIA. [s. d.]. **IDD - Instituto Durango Duarte**. Disponível em: <https://idd.org.br/iconografia/>. Acesso em: 2 nov. 2025.
- AZEVEDO, J. H.; SILVA, F. H. F.; CAMPOS, J. E. G. Atividade Neotectônica na Região de Porto Trombetas, Pará, Brasil: evidências, cinemática e influências na hidrogeologia. **Anuário do Instituto de Geociências**, Rio de Janeiro, BR., v. 43, n. 3, p. 47_62, 2020. DOI: 10.11137/2020_3_47_62. Disponível em: <https://revistas.ufrj.br/index.php/aigeo/article/view/38536>. Acesso em: 12 oct. 2025.

BARBOSA, T. S.; FURRIER, M. A geomorfologia antropogênica e a relação uso da terra com o risco geológico no município de João Pessoa – PB. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, [S. l.], v. 18, n. 1, 2017. DOI: 10.20502/rbg.v18i1.1064. Disponível em: <https://rbg.emnuvens.com.br/rbg/article/view/1064>. Acesso em: 15 jul. 2024.

BIELSKI, C.; LÓPEZ-VÁZQUEZ, C.; GROHMANN, C. H.; GUTH, P. L.; HAWKER, L.; GESCH, D.; TREVISANI, S.; HERRERA-CRUZ, V.; RIAZANOFF, S.; CORSEAU, A.; REUTER, H. I.; STROBL, P. Novel Approach for Ranking DEMs: Copernicus DEM Improves One Arc Second Open Global Topography. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 62, p. 1–22, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TGRS.2024.3368015>. Acesso em: 12 nov. 2024.

BORSATO, F.; MARTONI, A. M. Estudo da fisiografia das bacias hidrográficas urbanas no Município de Maringá, Estado do Paraná. **Acta Scientiarum. Human and Social Sciences**, v. 26, n. 2, p. 273–285, 20 dez. 2004. <https://doi.org/10.4025/actascihumansoc.v26i2.1391>.

BORSATO, Fabiano Hugo; MARTONI, Astrid Meira. Estudo da fisiografia das bacias hidrográficas urbanas no Município de Maringá, Estado do Paraná. *Acta Scientiarum. Human and Social Sciences*, v. 26, n. 2, p. 273-285, 2004.

CAPUTO, M.V. Discussão sobre a Formação Alter do Chão e o Alto de Monte Alegre. *In*: NASCIMENTO, R.S.C.; HORBE, A.M.C.; ALMEIDA, C.M. (Org.). **Contribuição à Geologia da Amazônia**. Manaus: SBG/Núcleo Norte, 2011. v. 7, p. 7–23.

CARVALHO, J. S. **Caracterização hidrogeológica da região a norte da cidade de Manaus, com base em informações geofísicas (resistividade elétrica), geológicas e geomorfológicas**. Tese (Doutorado em Clima e Ambiente), 20 mar. 2012. Disponível em: <https://repositorio.inpa.gov.br/handle/1/12953>. Acesso em: 12 out. 2025.

CARVALHO, J. S.; TOMASELLA, J. Aspectos morfoestruturais do relevo na região norte da cidade de Manaus e suas influências na dinâmica do Aquífero Alter do Chão. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, (S. l.), v. 14, n. 3, 2014. DOI: 10.20502/rbg.v14i3.430. Disponível em: <https://rbgeomorfologia.org.br/rbg/article/view/430>. Acesso em: 12 out. 2025.

CARVALHO, J. S.; TOMASELLA, J.; SHIRAIWA, S.; ARAUJO, R. L. C. Stratigraphic aspects of the Alter do Chão Formation in the northern region of Manaus, based on geoelectric information. **Brazilian Journal of Geophysics**, (S.l.), v. 32, n. 1, p. 61 - 70, mar. 2014. ISSN 2764-8044. Disponível em: <<https://sbgf.org.br/revista/index.php/rbgf/article/view/397/157>>. Acesso em: 13 out. 2025. doi: <http://dx.doi.org/10.22564/rbgf.v32i1.397>.

CASSETI, V. **Ambiente e apropriação do relevo**. 2. ed. São Paulo: Editora Contexto, 1995.

CERTINI, G.; SCALENGHE, R.; WOODS, W. I. The impact of warfare on the soil environment. **Earth-Science Reviews**, v. 127, p. 1–15, dez. 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.08.009>. Acesso em: 11 jul. 2024.

CHRISTOFOLETTI, Antônio. **Geomorfologia**. São Paulo: Edgard Blücher, 1980. 189p.

CONTI, J. B. Geografia e Paisagem. **Ciência e Natura**, [S. l.], v. 36, nº 3, p. 239–245, 2014. DOI: 10.5902/2179460X13218. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/cienciaenatura/article/view/13218>. Acesso em: 20 jul. 2024.

COSTA, E. B. S.; SILVA, C. L.; SILVA, M. L. Caracterização física de bacias hidrográficas na região de Manaus - AM. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 14, n. 46, p. 93–100, 2013. DOI: 10.14393/RCG144619846. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/article/view/19846>. Acesso em: 18 out. 2025.

COSTA, E. B. S.; SILVA, M. L. Análise morfométrica de bacias hidrográficas na região de Manaus. *In*: Jornada de Iniciação Científica PIBIC INPA - CNPq/FAPEAM, 19., 2010, Manaus. **Anais...** Manaus: INPA, 2010. Disponível em: <https://repositorio.inpa.gov.br/bitstreams/caf63711-e962-4e08-8958-874bdc50026/download>. Acesso em: 18 out. 2025.

COSTA, F. T. **Seleção de indicadores hidroambientais como subsídio à gestão sustentável dos recursos hídricos na bacia hidrográfica do rio Puraquequara, Manaus-Amazonas**. 2023. 126 f. Dissertação (Mestrado em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos) – Universidade do Estado do Amazonas, Escola Normal Superior, Manaus, 2023. Disponível em: <https://pos.uea.edu.br/data/area/dissertacao/download/61-46.pdf>. Acesso em: 24 out. 2025.

COSTA, J. B. S.; BEMERGUY, R. L.; HASUI, Y.; BORGES, M. S.; JÚNIOR, C. R. P. F.; BEZERRA, P. É. L.; COSTA, M. L.; FERNANDES, J. M. G. Neotectônica da Região Amazônica: aspectos tectônicos, geomorfológicos e deposicionais. **Geonomos**, (s. l.), 1 dez. 1996. DOI 10.18285/geonomos.v4i2.199. Disponível em: <https://periodicos.ufmg.br/index.php/revistageonomos/article/view/11499>. Acesso em: 12 out. 2025.

CUNHA, P. R. C.; GONZAGA, F. G.; COUTINHO, L. F. C.; FEIJÓ, F. J. Bacia do Amazonas. **Boletim de Geociências da Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 8, n. 1, p. 47–55, 1994. Disponível em: <https://bgp.petrobras.com.br/bgp/article/view/580>. Acesso em: 12 out. 2025.

D'AVILA JUNIOR, J. C. M.; VIEIRA, A. F. S. G. Padrões pluviométricos da cidade de Manaus-AM: 1986 a 2015. **Boletim Paulista de Geografia**, [S. l.], v. 1, n. 102, p. 1–31, 2019. Disponível em: <https://publicacoes.agb.org.br/boletim-paulista/article/view/1508>. Acesso em: 25 out. 2025.

DANTAS, M. E.; MAIA, M. A. M. Compartimentação geomorfológica. *In*: CPRM. **Geodiversidade do Estado do Amazonas**. Manaus: CPRM, 2010. p. 27–44.

DUBREUIL, V.; FANTE, K. P.; PLANCHON, O.; NETO, J. L. S. Os tipos de climas anuais no Brasil : uma aplicação da classificação de Köppen de 1961 a 2015. **Confins. Revue franco-brésilienne de géographie / Revista franco-brasileira de geografia**, [s. l.], n. 37, 24 set. 2018. DOI 10.4000/confins.15738. Disponível em: <https://journals.openedition.org/confins/15738#citedby>. Acesso em: 25 out. 2025.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA); EMBRAPA SOLOS; BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2013. 353 p.: il. color.; cm x cm. Inclui anexos. ISBN 978-85-7035-198-2.

FONSECA, J. G. P. **Análise introdutória do processo de ocupação urbana em Manaus e suas consequências socioambientais**: o estudo de caso das comunidades São Pedro, travessa Arthur Bernardes e Bariri. 2008. 103 f. Dissertação (Mestrado em Ciências do Ambiente e Sustentabilidade na Amazônia) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2008.

FRANÇA, R. M. Proposta metodológica de identificação do alto, médio e baixo curso da bacia hidrográfica do rio Cocó, Ceará, Brasil. **Geosaberes**, Fortaleza, v. 10, n. 21, pág. 1 a 11, maio de 2019.

FRANZINELLI, E.; IGREJA, H. L. S. Utilização do sensoriamento remoto na investigação da área do baixo Rio Negro e Grande Manaus. *In*: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 6., 1990, São José dos Campos. **Anais....** São José dos Campos: INPE, 1990. v. 3, p. 641–648.

FRANZINELLI, E.; IGREJA, H. Ponta das Lajes e o Encontro das Águas, AM: a Formação Alter do Chão como moldura geológica do espetacular Encontro das Águas Manauara. *In*: WINGE, M.; SCHOBENHAUS, C.; FERNANDES, A. C. S.; SOUZA, C. R. G.; BERBERT-BORN, M.; SALLUN FILHO, W.; QUEIROZ, E. T. (org.). **Sítios geológicos e paleontológicos do Brasil**. Brasília: CPRM; SIGEP, 2013. v. 3. p. 263-281. Disponível em: <https://www.cavernas.org.br/publicacao_digital/sitios-geologicos-e-paleontologicos-do-brasil-volume-3/>. Acesso em: 18 out. 2025.

FURTADO, A. R.; CARMO, M. R.; CARDOSO, R. B. R. Caracterização geomorfológica da bacia do Puraquequara, Manaus-AM. *In*: Congresso Brasileiro de Geologia, 48., 2016, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Geologia, 2016. v. único. p. 1353-1353.

GIRÃO, I. R. F.; RABELO, D. R.; ZANELLA, M. E. Análise teórica dos conceitos: Riscos Socioambientais, Vulnerabilidade e Suscetibilidade. **Revista de Geociências do Nordeste**, [S. l.], v. 4, p. 71–83, 2018. DOI: 10.21680/2447-3359.2018v4n0ID13273. Disponível em: <https://periodicos.ufrn.br/revistadoregna/article/view/13273>. Acesso em: 23 jan. 2026.

GIRÃO, O.; CORRÊA, A. C. de B. A contribuição da geomorfologia para o planejamento da ocupação de novas áreas. **Revista de Geografia**. Recife: UFPE DCG/NAPA, [S. l.], v. 21, nº 2, p. 36-58, jul/dez. 2004. Disponível em: <https://morrodobau.paginas.ufsc.br/files/2011/03/CONTRIBUI%C3%87%C3%83O-DA-GEOMORFOLOGIA-PARA-O1.pdf>. Acesso em: 10 jul. 2024.

GOMES, A. L. S.; BENETTON, M. L. F. N.; SANTOS, I. G. C.; FERREIRA, E. D. C.; MAGALHÃES, F. F. C. As aventuras de seres miudinhos no Lago Puraquequara. *In*: RUBIM, M. A. L.; FERRAZ, L. R. (Org.). **Puraquequara em mosaico** [recurso eletrônico]: histórias, vidas e recursos naturais. Manaus: FUA, 2020. p. 199-210. Disponível em: https://riu.ufam.edu.br/bitstream/prefix/5853/5/Ebook_PuraquequaraemMosaico.pdf. Acesso em: 31 out. 2025.

GONÇALES, S. C. B.; MIRANDA, J. S. N. Caracterização da qualidade das águas subterrâneas do Aquífero Alter do Chão, estudos de caso das estações da Rede de Monitoramento de Águas Subterrâneas (RIMAS - CPRM) no município de Manaus-AM. *In*: Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 18., 2014, Belo Horizonte. **Anais...** São Paulo: ABAS, 2014.

GOUDIE, A. S.; BURT, T. P.; VILES, H. A. The global transformation of geomorphology. *In*: BURT, T. P.; GOUDIE, A. S.; VILES, H. A. (orgs.). **The History of the Study of Landforms or the Development of Geomorphology: Volume 5: Geomorphology in the Second Half of the Twentieth Century.** [S. l.]: Geological Society of London, 2022. p. 0. DOI 10.1144/M58-2021-37. Disponível em: <https://doi.org/10.1144/M58-2021-37>. Acesso em: 31 jul. 2024.

GOUDIE, A. The human impact in geomorphology – 50 years of change. **Geomorphology**, v. 366, p. 106601, out. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.12.002>.

HORBE, A. M. C.; GOMES, I. L. F.; MIRANDA, S. F.; SILVA, M. do S. R. da. Contribuição à hidroquímica de drenagens no Município de Manaus - AM. **Acta Amazonica**, (s. l.), v. 35, n. 2, p. 119–124, abr. 2005. DOI 10.1590/S0044-59672005000200002. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0044-59672005000200002>.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Províncias estruturais, compartimentos de relevo, tipos de solos, regiões fitoecológicas e outras áreas.** Rio de Janeiro: IBGE, 2019. 176 p. il. (Coleção Ibgeana). (Macrocaracterização dos Recursos Naturais do Brasil).

JARDIM, P. F.; SIQUEIRA, V. A.; FLEISCHMANN, A. S.; FAN, F. M.; COLLISCHONN, W. IPH-Hydro Tools: pacote de ferramentas open source de geoprocessamento aplicado a recursos hídricos. *In*: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 21., 2015, Brasília. **Anais [...]**. Brasília: ABRH, 2015. p. 1-8.

KOEPPEN, W. **Climatología: con un estudio de los climas de la tierra.** [S. l.]: Fondo de Cultura Económica, 1948(Sección de obras de geografía [del Fondo de Cultura Económica]). Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=Vad8AK0XXkYC>.

LIMA, G. S.; AMORIM, R. R. Suscetibilidade e vulnerabilidade: um impasse conceitual que dificulta a responsabilização pelo desastre. *In*: Comemoração aos 20 anos do Programa de Pós-Graduação em Geografia (IG-UNICAMP), v. 1, n. 1, 2023, Campinas. **Anais...** Campinas: IG-UNICAMP, 2023. p. 50-60.

LIMA, M. C. A geoansiedade e o espaço urbano de Manaus. *In*: LIMA, S. P. M. de; SOUSA, I. dos S.; CONCEIÇÃO, F. S. da (Org.). **Amazônias: o urbano, o metropolitano e o agrário.** Manaus: EDUA; ALEXA CULTURAL, 2025. p. 18-31.

LIMA, M. C. **Quando o amanhã vem ontem: a institucionalização da região metropolitana de Manaus e a indução ao processo de metropolização do espaço na Amazônia ocidental.** 2014. Tese (Doutorado em Geografia Humana) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014. doi:10.11606/T.8.2014.tde-06042015-191044. Acesso em: 16 nov. 2024.

MADY, F. T. M.; MADY, C. F. da S.; VIANA, Álefe L.; SILVA, M. E. C. M.; LOUZADA, J. L. P. C. De lugar da barra à metrópole: crescimento urbano e a fragmentação da floresta na cidade de Manaus, Amazonas. **Contribuciones a Las Ciencias Sociales**, [S. l.], v. 18, n. 6, p. e18897, 2025. DOI: 10.55905/revconv.18n.6-264. Disponível em: <https://ojs.revistacontribuciones.com/ojs/index.php/clcs/article/view/18897>. Acesso em: 31 out. 2025.

MAFRA, A. L.; MIKLÓS, A. a. W.; VOLKOFF, B.; MELFI, A. J. Pedogênese numa sequência Latossolo-Espodossolo na região do alto rio Negro, Amazonas. **Revista Brasileira de**

Ciência do Solo, [s. l.], v. 26, n. 2, p. 381–394, 1 jun. 2002. DOI 10.1590/S0100-06832002000200012. Disponível em: <https://www.rbcsjournal.org/pt-br/article/pedogenese-numa-sequencia-latossolo-espodossolo-na-regiao-do-alto-rio-negro-amazonas/>. Acesso em: 18 out. 2025.

MANAUS. Lei 671, de 04 de novembro de 2002. **Regulamenta o Plano Diretor Urbano e Ambiental, estabelece diretrizes para o desenvolvimento da Cidade de Manaus e dá outras providências relativas ao planejamento e à gestão do território do Município**. Disponível em: https://www.mpam.mp.br/images/attachments/articulo/4841/LEI_671_DE_04_11_2002.pdf#page=1.21. Acesso em: 16 nov. 2024.

MARSH, C. B.; HARDER, P.; POMEROY, J. W. Validation of FABDEM, a global bare-earth elevation model, against UAV-lidar derived elevation in a complex forested mountain catchment. **Environmental Research Communications**, v. 5, n. 3, p. 031009, mar. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/2515-7620/acc56d>. Acesso em: 10 jul. 2024.

MEDEIROS, L. C.; FERREIRA, N. C.; FERREIRA, L. G. Avaliação de modelos digitais de elevação para delimitação automática de bacias hidrográficas. **Revista Brasileira de Cartografia**, Monte Carmelo, v. 61, n. 2, p. 137-151, 2009. ISSN: 0560-4613. Disponível em: <http://repositorio.bc.ufg.br/handle/ri/21131>.

MELO, D. H. C. T. B.; MENDONÇA, L. F. F. de; SANTANA, J. O.; RAIMUNDO, R. D. P. Evolução da observação da terra por Sensoriamento Remoto. **Revista Brasileira de Sensoriamento Remoto**, v. 2, n. 2, p. 002–024, 21 jul. 2021. ISSN: 2675-5491. Disponível em: <https://doi.org/10.5281/zenodo.5120454>. Acesso em: 10 jul. 2024.

MIRANDA, M. J. O. **O uso de geotecnologias na análise temporal do processo de expansão urbana sobre a Bacia Hidrográfica do Puraquequara: Manaus - AM**. 2017. 112 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Instituto de Filosofia, Ciências Humanas e Sociais, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2017.

MIRANDA, M. J. O. **O uso de geotecnologias na análise temporal do processo de expansão urbana sobre a Bacia Hidrográfica do Puraquequara: Manaus - AM**. 2017. 112 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2017.

MOLINARI, D. C. Poder Público em Ação: Ações Preventivas/Corretivas em Áreas de Risco Realizadas pela Defesa Civil Municipal de Manaus (AM) (2010-2023). **Revista Geopolítica Transfronteiriça**, [S.l.], v. 8, n. 4, p. 01-19, jul. 2024. ISSN 2527-2349. Disponível em: <https://periodicos.uea.edu.br/index.php/revistageotransfronteirica/article/view/3781>. Acesso em: 16 nov. 2024.

MOLINARI, D. C. **Vulnerabilidade ambiental em áreas de risco à voçorocamento em Manaus (AM)**. 2023. 455f. Tese (Doutorado em Geografia) - Instituto de Filosofia, Ciências Humanas e Sociais, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2023.

MOREIRA, R. M. **Impactos Ambientais em Área de Preservação Permanente da Bacia Hidrográfica do Puraquequara, Manaus — Amazonas**. 2012. Monografia (Aperfeiçoamento/Especialização em Engenharia Florestal) — Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2011.

MUSTAFA, F. B. The Importance of Methodology in Geography. *In*: MUSTAFA, F. B. (org.). **Methodological Approaches in Integrated Geography**. Cham: Springer International

Publishing, 2023. p. 1–8. DOI 10.1007/978-3-031-28784-8_1. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-031-28784-8_1. Acesso em: 07 set. 2024.

NAZARETH, T.; BRASIL, M.; TEIXEIRA, P. Manaus: crescimento populacional e migrações nos anos 1990. **Revista Paranaense de Desenvolvimento - RPD**, [S. l.], n. 121, p. 201–217, 2012. Disponível em: <https://ipardes.emnuvens.com.br/revistaparanaense/article/view/431>. Acesso em: 29 jul. 2024.

NETO, R. M. A abordagem sistêmica e os estudos geomorfológicos: algumas interpretações e possibilidades de aplicação. **GEOGRAFIA (Londrina)**, [S. l.], v. 17, nº 2, p. 67–86, 2009. DOI: 10.5433/2447-1747.2008v17n2p67. Disponível em: <https://ojs.uel.br/revistas/uel/index.php/geografia/article/view/2354>. Acesso em: 10 jul. 2024.

NEVES, R. K. R. **Subsídios para o planejamento e gestão dos recursos hídricos na bacia do rio Puraquequara**. 2018. Dissertação (Mestrado em Gestão e Regulação dos Recursos Hídricos) – Universidade do Estado do Amazonas, Manaus, 2018. Disponível em: <http://www.pos.uea.edu.br/data/area/dissertacao/download/35-14.pdf>. Acesso em: 12 out. 2025.

NEVES, R. K. R.; BATISTA, I. H.; SILVA, J. R. C.; SOUZA FILHO, E. A.; NEVES, E. P. L. Evolução espaço-temporal do uso e cobertura da terra na bacia do rio Puraquequara (Manaus-AM). **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 21, n. 73, p. 347-355, mar. 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/RCG217348564>. Acesso em: 18 out. 2025.

NOGUEIRA, A. C. F.; SANSON, F.; PESSOA, K. A expansão urbana e demográfica da cidade de Manaus e seus impactos ambientais. In: Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2007, Florianópolis. **Anais eletrônicos...** São José dos Campos, INPE, 2007. Disponível em: <http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.14.17.45/doc/5427-5434.pdf>. Acesso em: 16 nov. 2024.

NOGUEIRA, A. C. R.; VIEIRA, L. C.; SUGUIO, K. Paleossolos da formação Alter do Chão, cretáceo-terciário da Bacia do Amazonas, regiões de Presidente Figueiredo e Manaus. 1999, **Anais...** Rio Claro: UNESP, 1999. p. 261-266. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/directbitstream/d96873a4-a996-4c72-93e6-62e0330faee9/1055442.pdf>. Acesso em: 12 out. 2025.

NUNES, J. O. R.; PERUSI, M. C. ; FUSHIMI, M.; MORENO, M. S.; THOMAZINI, L. S. Estabilização de erosão hídrica em Antropossolos com técnicas de bioengenharia na Área de Proteção Ambiental de Uso Sustentável do Timburi, município de Presidente Prudente, SP, Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, [S. l.], v. 24, nº 00, 2023. DOI: 10.20502/rbgeomorfologia.v24i00.2325. Disponível em: <https://www.rbgeomorfologia.org.br/rbg/article/view/2325>. Acesso em: 10 jul. 2024.

PASCHOAL, L. G.; SIMON, A. L. H.; CUNHA, C. M. L. Geomorfologia antropogênica e sua inserção em pesquisas brasileiras. **Geographia Meridionalis**, v. 1, n. 1, p. 95-126, 2015. DOI: <https://doi.org/10.15210/gm.v1i1.5691>. Disponível em: <https://periodicos.ufpel.edu.br/index.php/Geographis/article/view/5691>. Acesso em: 15 jul. 2024

PINHEIRO JÚNIOR, J. R.; SILVA, P. A.; COSTA, L. A.; BARROS, S. Classificação da cobertura do solo por meio de imagem CBERS na área do entorno da Reserva Florestal Adolpho

Ducke, Manaus - AM. *In*: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 12. (SBSR), 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. p. 1063-1066. CD-ROM, On-line. ISBN 85-17-00018-8. Disponível em: <http://urlib.net/ibi/ltid.inpe.br/sbsr/2004/11.11.18.43>.

PIRES, J. M. Tipos de vegetação da Amazônia. *In*: SIMÕES, M. F. (Ed.). **O Museu Goeldi no ano do sesquicentenário**. Belém, PA: Museu Paraense Emílio Goeldi, 1973. p. 179-202. (Museu Paraense Emílio Goeldi. Publicações avulsas, 20). Disponível em: <http://www.info-teca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/395111>. Acesso em: 27 out. 2025.

PROJETO RADAMBRASIL. Folha SA. 20 **Manaus**: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação, uso potencial da terra. v. 18. Rio de Janeiro: O Projeto, 1978. 623 p.: il. (Levantamento de recursos naturais, v. 18). ISBN 2408138900. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?id=224035&view=detalhes>. Acesso em: 27 out. 2025.

QUEIROZ NETO, J. C. **Valores de referência para parâmetros de qualidade da água, adaptados a rios de água preta, como subsídio ao enquadramento da Bacia do Rio Puraquequara em Manaus, Amazonas, Brasil**. 2023. 124 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos) – Universidade do Estado do Amazonas, Manaus, 2023.

QUEIROZ NETO, J. C.; ALBUQUERQUE, C. C.; BATISTA, I. H. Qualidade da água e definição de parâmetros preponderantes para monitoramento no Rio Puraquequara, Manaus, Amazonas, Brasil. **Boletim de Geografia**, v. 41, p. 316-336, e66628, 23 ago. 2023.

REIS, N. J.; ALMEIDA, M. E.; RIKER, S. L.; FERREIRA, A. L. **Geologia e recursos minerais do estado do Amazonas**. [s. l.], 2006. Disponível em: <http://rigeo.sgb.gov.br/jspui/handle/doc/2967>. Acesso em: 12 out. 2025.

ROCHA, P. C. A. Estudo das condições ambientais da bacia hidrográfica do rio Puraquequara, Manaus-AM. 2022. **Relatório Técnico** (Mestrado Profissional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos) – Universidade do Estado do Amazonas, Manaus, 2022.

RODRIGUES, S. C.; DANELON, J. R. B.; BARCELOS, A. C. A Geomorfologia e as interações humanas: Contribuições Teóricas da Geomorfologia Antropogênica. **Physis Terrae - Revista Ibero-Afro-Americana de Geografia Física e Ambiente**, Guimarães, Portugal, v. 4, nº 1-2, p. 45–63, 2022. DOI: 10.21814/physisterrae.4159. Disponível em: <https://revistas.uminho.pt/index.php/physisterrae/article/view/4159>. Acesso em: 10 jul. 2024.

SANTOS, J. M.; SILVA, M.; SILVA, C. Análise de perfis longitudinais e knickpoints nas bacias hidrográficas do rio Tarumã-Açu e Puraquequara na região de Manaus (AM). *In*: Jornada de Iniciação Científica PIBIC INPA – CNPq/FAPEAM, 19., 2010, Manaus. **Anais...** Manaus: INPA, 2010. Disponível em: <https://repositorio.inpa.gov.br/items/77aea36e-0ec2-4327-b7a0-2bc79805b68f>. Acesso em: 18 out. 2025.

SARGES, R. R. **Relações entre estrutura tectônicas, sedimentação coluvial e geomorfogênese na região de Manaus, Amazonas**. 2007. 109f. Tese (Doutorado em Geoquímica e Geotectônica). Programa de Pós-graduação em Geoquímica e Geotectônica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

SARGES, R. R.; SILVA, T. M.; RICCOMINI, C. Caracterização do relevo da região de Manaus, Amazônia Central. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, [S. l.], v. 12, n. 1, 2011.

DOI: 10.20502/rbg.v12i1.222. Disponível em: <https://rbgeomorfologia.org.br/rbg/article/view/222>. Acesso em: 18 out. 2025.

SCHAEFER, C. E. G. R.; DE LIMA, H. N.; TEIXEIRA, W. G.; DO VALE, J. F.; DE SOUZA, K. W.; CORRÊA, G. R.; DE MENDONÇA, B. A. F.; AMARAL, E. F.; CAMPOS, M. C. C.; RUIVO, M. L. III - Solos da região amazônica. In: CURI, N.; KER, J. C.; NOVAIS, R. F.; VIDAL-TORRADO, P.; SCHAEFER, C. E. G. R. (Org.). **Pedologia — Solos dos Biomas Brasileiros**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2017. p. 112-175. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Maria-Ruivo-3/publication/319460286_Solos_da_regiao_Amazonica/links/6143c1838a9a2126664dc950/Solos-da-regiao-Amazonica.pdf. Acesso em: 25 out. 2025.

SILVA, C. L. **Análise da tectônica Cenozóica na região de Manaus e adjacências**. Rio Claro, 2005, 282p. Tese (Tese de Doutorado em Geologia Regional) – Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Acesso em: 12 out. 2025

SILVA, D. X.; BARCELLOS, C.; BACURI, R. **Diagnóstico preliminar da vulnerabilidade e as previsões dos efeitos das mudanças climáticas na saúde pública no município de Manaus**. Relatório preliminar do projeto “Guidance for Conducting Assessments of Health Vulnerability and Public Health and Health Care Interventions to Address Climate Change”. Manaus: Fiocruz, 2010. Disponível em: <https://www.iciet.fiocruz.br/documentos/serie-clima-e-saude-sitio-sentinela-de-manau-am>. Acesso em: 25 out. 2025.

SILVA, J. R. C.; SCUDELLER, V. V. Os ciclos econômicos da borracha e a Zona Franca de Manaus: expansão urbana e degradação das microbacias. **Research, Society and Development**, [S. l.], v. 11, n. 6, p. e33611629103, 2022. DOI: 10.33448/rsd-v11i6.29103. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/29103>. Acesso em: 3 ago. 2024.

SILVA, J. R. C.; SCUDELLER, V. V. Os ciclos econômicos da borracha e a Zona Franca de Manaus: expansão urbana e degradação das microbacias. **Research, Society and Development**, [S. l.], v. 11, n. 6, p. e33611629103, 2022. DOI: 10.33448/rsd-v11i6.29103. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/29103>. Acesso em: 16 nov. 2024.

SILVA, J. R. C.; SCUDELLER, V. V. Os ciclos econômicos da borracha e a Zona Franca de Manaus: expansão urbana e degradação das microbacias. **Research, Society and Development**, [S. l.], v. 11, n. 6, p. e33611629103, 2022. DOI: 10.33448/rsd-v11i6.29103. Disponível em: <https://rsdjournal.org/rsd/article/view/29103>. Acesso em: 31 oct. 2025.

SILVA, L. de J. de S.; ERAZO, R. de L.; MENEGHETTI, G. A.; PINHEIRO, J. O. C.; SANTOS, A. C. dos. Serviços ambientais em espaço urbano-rural em Manaus (AM). **Brazilian Journal of Development**, [S. l.], v. 9, n. 1, p. 4384–4403, 2023. DOI: 10.34117/bjdv9n1-302. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/56600>. Acesso em: 31 oct. 2025.

SILVESTREIM, E. G.; VIEIRA, M. R. S.; SILVESTREIM, F. G.; LIMA FILHO, A. A.; LOPES, A. B. Uma visão sobre a degradação ambiental causada pelas ocupações irregulares em áreas verdes na cidade de Manaus-AM. **Research, Society and Development**, [S. l.], v. 10, n. 16, p. e290101623764, 2021. DOI: 10.33448/rsd-v10i16.23764. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/23764>. Acesso em: 16 nov. 2024.

SIOLI, H. Das Wasser in Amazonasgebiet. **Fosch. Fortschr**, 1950. v. 26 (21/22), p. 274-280.

SIQUEIRA, V.; FLEISCHMANN, A.; JARDIM, P.; FAN, F.; COLLISCHONN, W. IPH-Hydro Tools: a GIS coupled tool for watershed topology acquisition in an open-source environment. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [S. l.], v. 21, n. 1, p. 274–287, 25 fev. 2016. DOI: [10.21168/rbrh.v21n1.p274-287](https://doi.org/10.21168/rbrh.v21n1.p274-287). Disponível em: <http://www.abrh.org.br/SGCv3/index.php?PUB=1&ID=188&SUMARIO=5166>. Acesso em: 19 nov. 2025.

SOUSA, N. M. B. A urbanização do Amazonas no presente: a manutenção da primazia urbana de Manaus. **Revista de Direito da Cidade**, [S. l.], v. 14, n. 3, p. 1906–1964, 2022. DOI: [10.12957/rdc.2022.59869](https://doi.org/10.12957/rdc.2022.59869). Disponível em: <https://www.e-publicacoes.uerj.br/rdc/article/view/59869>. Acesso em: 31 out. 2025.

SOUZA FILHO, E. A.; NEVES, R. K. R.; BATISTA, I. H.; MENDONÇA, S. B. S.; ALBUQUERQUE, C. C. Estudo preliminar da qualidade da água da bacia hidrográfica do Puraquequara-AM na área de confluência de usuários de Recursos Hídricos. In: Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente, 6., 2018, Bento Gonçalves. **Anais...** Caxias do Sul: Universidade de Caxias do Sul, 2018. p. [Páginas inicial-final]. Disponível em: <https://siambiental.ucs.br/congresso/anais/trabalhosTecnicos?ano=2018>. Acesso em: 31 out. 2025.

SOUZA, C. R.; AZEVEDO, C. P.; LIMA, R. M. B.; ROSSI, L. M. B. **Espécies florestais para produção de energia**. Manaus: Embrapa Amazônia Ocidental, 2008. (Circular Técnica, 31). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/669033/1/Circ-Tec312008.pdf>. Acesso em: 25 out. 2025.

SOUZA, D. R. S. **Indicadores de sustentabilidade na bacia hidrográfica do Puraquequara/Amazonas: interfaces de gestão dos recursos hídricos**. 2020. 107 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos) – Universidade do Estado do Amazonas, Manaus, 2020. Disponível em: <https://pos.uea.edu.br/data/area/dissertacao/download/42-18.pdf>. Acesso em: 24 out. 2025.

SOUZA, J. O. P. **Modelos de evolução da dinâmica fluvial em ambiente semiárido: bacia do açude do Saco, Serra Talhada, Pernambuco**. 2014. 189 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Recife, 2014.

SOUZA, M. L. **Ambientes e Territórios: Uma Introdução à Ecologia Política**. 1ª ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2019. 350 p.

STERNBERG, H. O. R. Vales tectônicos na planície Amazônica? **Revista Brasileira de Geografia**, Rio de Janeiro, v. 12, n. 4, p. 3–26, 1950.

STRAHLER, A. N. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. **GSA Bulletin**, [s. l.], v. 63, n. 11, p. 1117–1142, 1 nov. 1952. DOI [10.1130/0016-7606\(1952\)63%5B1117:HAAOET%5D2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1952)63%5B1117:HAAOET%5D2.0.CO;2). Disponível em: [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1952\)63\[1117:HAAOET\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1952)63[1117:HAAOET]2.0.CO;2). Acesso em: 24 out. 2025.

SUERTEGARAY, D. M. A. Tempos longos... Tempos curtos... Na análise da natureza. **Geografares**, Vitória, Brasil, nº 3, 2002. DOI: [10.7147/GEO3.1125](https://doi.org/10.7147/GEO3.1125). Disponível em: <https://periodicos.ufes.br/geografares/article/view/1125>. Disponível em:

SUERTEGARAY, D. M. A.; NUNES, J. O. R. A natureza da Geografia Física na Geografia. **Terra Livre**, [S. l.], v. 2, nº 17, p. 11–24, 2015. Disponível em: <https://publicacoes.agb.org.br/terralivre/article/view/337>. Acesso em: 10 jul. 2024.

TEIXEIRA, W.G.; ARRUDA, W.; SHINZATO, E.; MACEDO, R.S.; MARTINS, G. C.; LIMA, H.N.; RODRIGUES, T.E. Solos do Amazonas. In: MANSINI, M.A.; MARMOS, M.J.L. (Eds.) **Geodiversidade do Amazonas**. Rio de Janeiro: Serviço Geológico do Brasil - CPRM, p. 71-86, 2010.

TELETI, P. R.; LUIS, A. J. **Sea Ice Observations in Polar Regions**: Evolution of Technologies in Remote Sensing. v. 2013, 22 ago. 2013. DOI 10.4236/ijg.2013.47097. Disponível em: <http://www.scirp.org/journal/PaperInformation.aspx?PaperID=36765>. Acesso em: 12 nov. 2024.

THE MODERN EVOLUTION OF GEOMORPHOLOGY — BINGHAMTON AND PERSONAL PERSPECTIVES, 1970–2019 AND BEYOND. **Geomorphology**, v. 366, p. 106684, 1 out. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.02.028>.

THESTORF, K.; MAKKI, M. Soils and landforms of war — Pedological investigations 75 years after World War II. **Geomorphology**, v. 407, p. 108189, 15 jun. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.GEOMORPH.2022.108189>. Acesso em: 11 jul. 2024.

VASCONCELOS, J. T. S. Anatomia Aplicada e Biomecânica da Coluna Vertebral. In: NATOUR, J. (org.). **Coluna Vertebral**. 2. ed. São Paulo: Etcetera Editora, 2004. p. 17-40. Disponível em: <https://bvsms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/ColunaVertebral.pdf>. Acesso em: 07 set. 2024.

VIEIRA, A. F. S. G. **Desenvolvimento e distribuição de voçorocas em Manaus (AM)**: principais fatores controladores e impactos urbano-ambientais. 2008. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Florianópolis, 2008. Disponível em: <http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/91352>. Acesso em: 10 jul. 2024.

VIEIRA, A. F. S. G. **Desenvolvimento e distribuição de voçorocas em Manaus (AM)**: principais fatores controladores e impactos urbano-ambientais. Tese de Doutorado. Florianópolis: DPGG/UFSC, 2008. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/91352> Acesso em 22 de janeiro de 2025.

VILLEGAS, J. M. C. **Geologia estrutural da Bacia do Marajó**. Dissertação (Mestrado em Geologia e Geoquímica) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 1994. Disponível em: <http://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/11977>. Acesso em: 12 out. 2025.

VIEIRA, C. A.; ALEIXO, N. A. C. R.; ALMEIDA FILHO, L. S. Eventos extremos de temperatura do ar e doenças respiratórias em Manaus-AM: Uma análise episódica. **Estrabão**, [S. l.], v. 5, n. 1, p. 119–130, 2024. DOI: 10.53455/re.v5i1.226. Disponível em: <https://revista.estrabao.press/index.php/estrabao/article/view/226>. Acesso em: 25 jan. 2026.