

VULNERABILIDADE ECOAMBIENTAL PARA GESTÃO E PROTEÇÃO AMBIENTAL DA BACIA HIDROGRÁFICA DO TARUMÃ-AÇU (AMAZÔNIA CENTRAL)

Liange de Sousa Rodrigues

Universidade do Estado do Amazonas, Mestrado Profissional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos,
Manaus, AM, Brasil,
liangerodrigues@yahoo.com

Jamerson Souza da Costa

Universidade Estadual de Feira de Santana, Programa de Pós-Graduação em Botânica, Feira de Santana, BA,
Brasil,
jamersonjsc@yahoo.com.br

Aline Gabriela Castro da Silva

Universidade do Estado do Amazonas, Mestrado Profissional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos,
Manaus, AM, Brasil,
alinegabriela@hotmail.com

Ieda Hortêncio Batista

Universidade do Estado do Amazonas, Mestrado Profissional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos,
Manaus, AM, Brasil,
iedahbatista@gmail.com

Maria Astrid Rocha Liberato

Universidade do Estado do Amazonas, Mestrado Profissional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos,
Manaus, AM, Brasil,
mliberato@uea.edu.br

Maria da Glória Gonçalves de Melo

Universidade do Estado do Amazonas, Mestrado Profissional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos,
Manaus, AM, Brasil,
mgmelo@uea.edu.br

RESUMO

A Bacia Hidrográfica do Rio Tarumã-Açu consiste em uma área estratégica de atuação de políticas públicas relativas à gestão de recursos hídricos no Amazonas. Foi realizado o levantamento da vulnerabilidade ecoambiental (natural e ambiental), visando à proposição de zonas ambientais para a bacia. Foram caracterizados os aspectos físicos (solos, geologia, vulnerabilidade do relevo, erosividade da chuva) e antrópicos (uso e cobertura da terra), analisados sistematicamente por meio da aplicação da metodologia de vulnerabilidade à perda de solo. Os dados do mapeamento foram submetidos à Análise Hierárquica de Processos (AHP), sendo posteriormente integrados a partir da Álgebra de Mapas. A vulnerabilidade ambiental foi associada aos limites de áreas legalmente protegidas e com fins de ordenamento existentes, como as Áreas de Proteção Ambiental (APA), Reservas Florestais e Projetos de Assentamento, resultando nas seguintes zonas ambientais: Preservação Prioritária, Desenvolvimento, Uso Sustentável, Preservação/Recuperação e Recuperação. O mapeamento da vulnerabilidade natural e ambiental aponta a predominância de ambientes de média vulnerabilidade, concentrados nos setores inferior e superior da bacia. As zonas ambientais podem fornecer estratégias de conservação e recuperação pautadas nos impactos das perturbações naturais e antropogênicas, visando à proteção dos recursos hídricos, essenciais para ações de planejamento e uso sustentável na bacia.

Palavras-chave: Manaus. Recursos Hídricos. Geotecnologias. Zona Ambiental.

ECO-ENVIRONMENTAL VULNERABILITY FOR ENVIRONMENTAL MANAGEMENT AND PROTECTION OF THE TARUMÃ-AÇU HYDROGRAPHIC BASIN (CENTRAL AMAZON)

ABSTRACT

The Tarumã-Açu River Basin is a strategic area for public policies related to water resource management in Amazonas. The study aimed to survey the eco-environmental vulnerability (natural and environmental) and propose environmental zones for the basin. The physical (soils, geology, relief vulnerability, rainfall-erosion) and anthropic aspects (land use and cover) were characterized and systematically analyzed using the methodology for land vulnerability to soil loss. The mapping data were submitted to the Analytic Hierarchy Process (AHP) and integrated using Map Algebra. Environmental vulnerability was associated with the limits of legally protected areas and planning purposes in the basin, such as Environmental Protection Areas (APA), Forest Reserves, and Settlement Projects, resulting in the following environmental zones: Priority Preservation; Development; Sustainable Use; Preservation/Recovery; and Recovery. The mapping of natural and environmental vulnerability indicates the predominance of medium-vulnerability environments, concentrated in the lower and upper sectors of the basin. Environmental zones can provide conservation and recovery strategies based on the impacts of natural and anthropogenic disturbances, aiming to protect water resources, which are essential for planning actions and sustainable use in the basin.

Keywords: Manaus. Water Resources. Geotechnologies. Environmental Zone.

INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas, as atividades humanas e os riscos naturais vêm aumentando a pressão sobre os ecossistemas globais e regionais (Xia et al., 2021), sobretudo nos trópicos (Browning; Sawyer, 2021). Nos últimos anos, as bacias amazônicas têm experimentado eventos de secas extremas (Espinoza et al., 2024; Mamani et al., 2025; Marengo et al., 2024), como resultado dessas alterações do clima e da paisagem natural, com tendência de aquecimento (Marengo et al., 2022), alongamento da estação seca (Arias et al., 2020; Espinoza et al., 2021) e aumento das emissões de carbono (Gatti et al., 2021). A intensificação das mudanças no uso e cobertura da terra afeta regionalmente o ciclo hidrológico (Espinoza et al., 2024), e a queda dos níveis dos rios na Amazônia impacta a população que vive perto dos rios e as comunidades indígenas, limitando o acesso a bens essenciais (e.g., água potável e alimentos seguros) e a serviços básicos, como transporte (De Lima et al., 2024; Jimenez et al., 2024). Em bacias com apelo turístico, como a Bacia Hidrográfica do Rio Tarumã-Açu (BHTA), afluente do Rio Negro, na Amazônia Central, além do comprometimento às populações locais, há também prejuízos às atividades de turismo, parte importante da economia local e regional.

O modelo de desenvolvimento exploratório adotado na região da BHTA e a intensificação do processo de urbanização impactam direta e indiretamente a disponibilidade e a qualidade dos recursos naturais (Costa et al., 2021a; 2021b). De acordo com Colares et al. (2022), a paisagem natural da bacia está sendo rapidamente convertida para usos antrópicos, exigindo a efetiva implementação de políticas de gestão e conservação dos recursos naturais, capazes de mitigar os impactos das transformações humanas e de promover a sustentabilidade das dinâmicas eco-hidrológicas responsáveis pelo suporte às atividades econômicas e sociais que ocorrem na bacia (Costa et al., 2021a; 2021b). Assim, avaliar como as variações naturais podem afetar os ecoambientes, por meios diretos e indiretos, é de grande importância para a gestão ambiental e para o desenvolvimento sustentável (Nguyen; Liou, 2019; Browning; Sawyer, 2021). A avaliação da vulnerabilidade ecoambiental resultante de perturbações naturais e antrópicas desempenha um papel fundamental no delineamento de instrumentos de política para a conservação e gestão dos recursos naturais, em níveis local e regional, ao fornecer informações sobre o contexto ecológico e ambiental da paisagem (Garnier et al., 2017).

Tradicionalmente, a vulnerabilidade ecoambiental (natural e ambiental) é considerada uma função de exposição, sensibilidade e capacidade adaptativa acerca de aspectos físicos, ambientais, socioeconômicos e culturais (Turner et al., 2003). Neste estudo, tratamos dos riscos de danos ao ambiente natural em razão de perturbações físicas e dinâmicas antropogênicas (Choudhary; Borin; Kupriyanov, 2018; Nguyen et al., 2016), usando técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento para avaliação da vulnerabilidade. Em razão da complexidade das interações homem-natureza, que afetam significativamente o meio ambiente, não há regras gerais de seleção de

variáveis para caracterizar a resposta do ecoambiente às forças motrizes naturais e humanas (Nguyen; Liou, 2019). Com base nos princípios da ecodinâmica de Tricart (1977), utilizamos conjuntos de dados que sintetizam os principais determinantes de perturbação (solos, geologia, topografia, precipitação e uso e cobertura da terra) para mapear a vulnerabilidade ecoambiental da BHTA, na Amazônia Central, identificando pontos críticos para pesquisadores ambientais e tomadores de decisão, com fins de sustentabilidade, conservação e desenvolvimento (Anfuso et al., 2021; Browning; Sawyer, 2021; Busman; Amaro; Sousa-Filho, 2016; Klais et al., 2012).

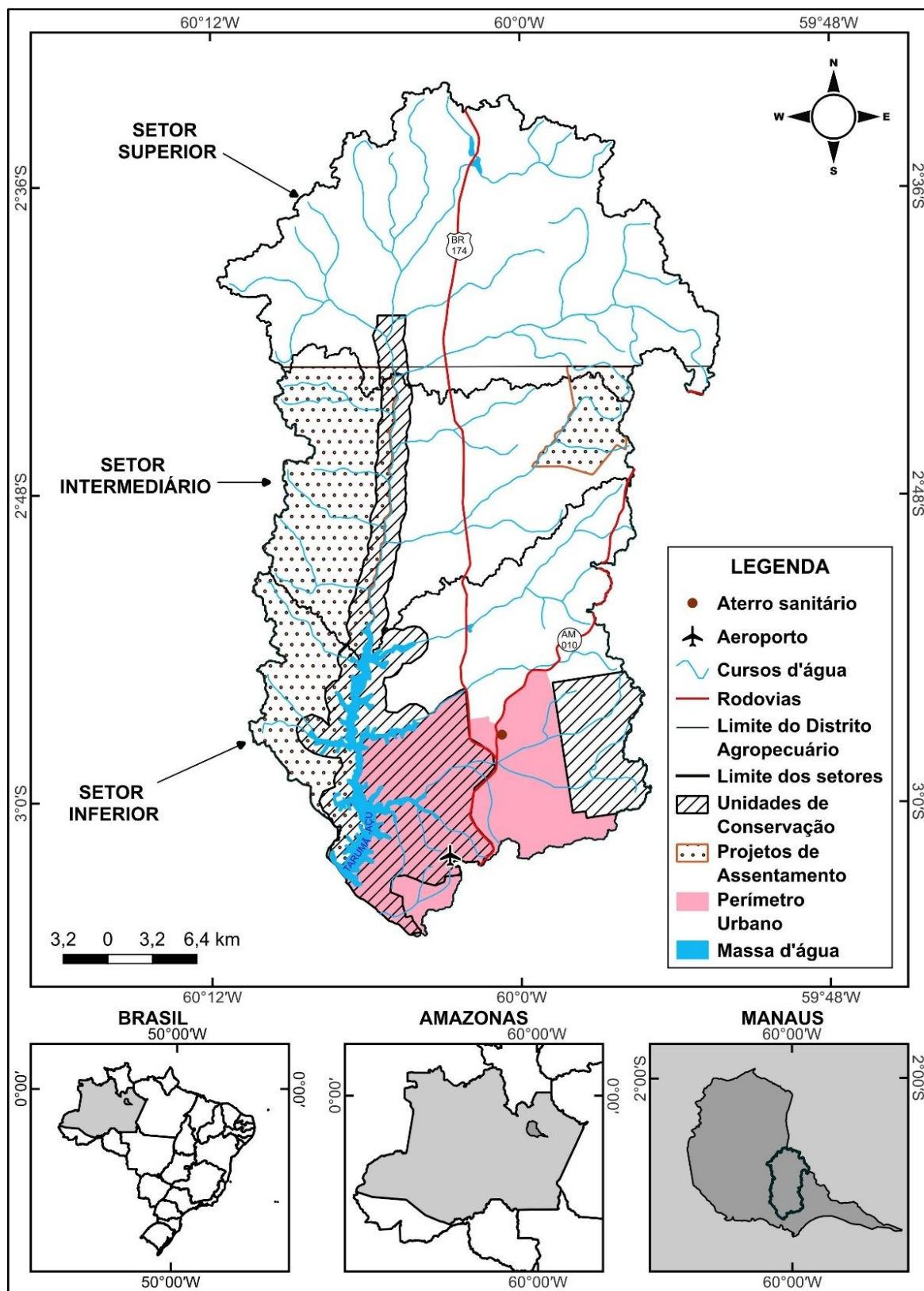
Os estudos de vulnerabilidade são também base para a definição de modelos de zoneamento, indicando restrições e potencialidades das áreas avaliadas e subsidiando decisões sobre usos futuros e/ou adequação daqueles já consolidados (Tagliani, 2016). Considerando que a degradação do ecoambiente é resultado da dinâmica interativa, quando seus componentes sofrem perturbações naturais ou ambientais, as mudanças se retroalimentam, causando declínio na estrutura e função do sistema (Xia et al., 2021). Portanto, estratégias de gestão, restauração e conservação dos recursos naturais precisam ponderar a vulnerabilidade ecoambiental e as propostas de zoneamento derivadas dessa avaliação na construção de diretrizes de desenvolvimento sustentável. As crescentes perturbações causadas pelo uso inadequado da terra na BHTA ameaçam o sistema eco-hidrológico (Costa et al., 2021a; 2021b). Dessa forma, o presente trabalho teve como objetivo realizar o levantamento da vulnerabilidade ecoambiental quantificada, integrando sensoriamento remoto, geoprocessamento e conjunto de dados socioambientais para a BHTA, apresentando o primeiro mapa de vulnerabilidade ecoambiental para a bacia e a proposição de zonas ambientais, integrando as informações ambientais e o arcabouço teórico produzido sobre os temas analisados. Nosso estudo, que apresenta parte dos resultados da dissertação de mestrado do primeiro autor, fornece um panorama dos impactos acumulativos de perturbações naturais e antropogênicas sobre a BHTA, podendo subsidiar, de maneira importante, os tomadores de decisão na definição de metas de melhoria em áreas específicas e na projeção e adoção de novas ações de gestão e conservação, enquanto acompanham a evolução dos demais aspectos ambientais da bacia.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

A BHTA abrange 1.388,94 km², o equivalente a 12,18% do território do município de Manaus, capital do Estado do Amazonas, na Amazônia Central (Figura 1). Com 80,9 km de extensão, o principal rio da bacia é o Tarumã-Açu, afluente da margem esquerda do Rio Negro (Colares et al., 2022). A BHTA apresenta relevo tubuliforme, constituído por interflúvios tabulares com diferentes graus de dissecação, contornados por vales fechados e estreitos, limitados por vertentes íngremes, onde se encaixa a rede de drenagem (Sarges; Silva; Riccomini, 2011). As unidades geológicas que ocorrem na bacia compreendem os depósitos sedimentares da Sequência Terciária da Formação Alter do Chão, depósitos argilo-arenosos da Formação Belterra e Depósitos Aluvionares (Carvalho; Tomasella, 2013; Riker et al., 2016). O clima é do tipo quente e úmido (Af), segundo a classificação de Köppen (1936), com temperatura média anual superior a 26 °C e pouca variação sazonal, e média anual de precipitação de 2.420 mm, sendo agosto o mês mais seco (Alvares et al., 2013). Sua vegetação é formada principalmente por Floresta Ombrófila Densa em Terras Baixas, com perda de cobertura natural por ação antrópica, sobretudo na porção sudeste da bacia, onde se concentra a área urbana de Manaus (Wachholz et al., 2020).

Figura 1 - Bacia hidrográfica do Tarumã-Açu: Localização, 2025



Elaboração: Os autores, 2025.

Mapeamento dos aspectos físicos e antrópicos da BHTA

O mapeamento do uso e cobertura da terra foi realizado com base em imagem do satélite Landsat-8, sensor OLI, de 27 de julho de 2016, com resolução espacial de 30 m. Para a classificação do uso e cobertura, foram utilizadas as bandas espectrais 4 (vermelho), 5 (infravermelho) e 6 (infravermelho médio), obtidas junto ao catálogo de imagens do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2016) e pré-processadas no software livre QGIS v. 3.4.9 (QGIS Development Team, 2021). O processamento ocorreu com o auxílio do software livre SPRING v. 5.5.6 (INPE, 2021a), com a segmentação da imagem segundo o método de crescimento por regiões. Utilizou-se o classificador Bhattacharya (Oliveira; Mataveli, 2013) para a classificação supervisionada da imagem, a partir de amostras das classes distribuídas ao longo da bacia, de acordo com o *Manual de Uso e Cobertura da Terra* (IBGE, 2013). Na fase de validação, obteve-se um índice Kappa considerado excelente ($K = 0,98$; Landis; Koch, 1977).

Os dados vetoriais de Solos (2013) e Geologia (2016) foram extraídos do Banco de Dados de Informações Ambientais (DBIA), que disponibiliza uma base de informações desenvolvida pelo Projeto RADAM/BRASIL (IBGE, 2019). O pré-processamento, com o recorte dos vetores de acordo com os limites da bacia, foi realizado no software QGIS. Posteriormente, ainda nessa etapa, o arquivo vetorial foi convertido para o formato matricial. O mapeamento da vulnerabilidade do relevo foi realizado a partir da combinação dos mapas de declividade, hipsometria e forma do terreno (Silva Neto, 2013a). A declividade e a hipsometria derivaram do Modelo Digital de Elevação (MDE) do projeto *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) 1 Arc-Second Global, com resolução espacial de 30 m, disponível no portal Earth Explorer (USGS, 2021). Os dados de forma do terreno (FT) foram obtidos junto ao Projeto Topodata, do INPE (2021b), baseado no refinamento de imagens SRTM. Foram selecionadas as cenas que abrangem a área da bacia (02/615, 02/60, 03/615 e 03/60), com resolução espacial de 30 m.

Com o auxílio do software SPRING v. 5.5.6, foram realizados os procedimentos de álgebra de mapas sobre os Planos de Informação (PI) da declividade, da hipsometria e das formas do terreno. O peso da vulnerabilidade para cada classe dos PI variou de 0 a 1 (Oliveira et al., 2009). Para a hierarquização das variáveis, utilizou-se o método de análise hierárquica (*Analytic Hierarchy Process – AHP*), seguindo as ponderações propostas por Silva Neto (2013b). A comparação pareada dos fatores demonstrou validade estatística (razão de consistência, $RC = 0,016$; Materano; Brito, 2020). Aplicou-se a Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algébrico (LEGAL) para gerar o PI de vulnerabilidade do relevo. As classes utilizadas no fatiamento foram adaptadas de Vidal e Silva Neto (2020), a saber: muito fraca (0–0,20); fraca (0,20–0,40); moderada (0,40–0,60); forte (0,60–0,80); e muito forte (0,80–1,00).

A erosividade da chuva foi definida com base em dados de precipitação mensal, no período de 2000 a 2016, disponíveis no site *Series View*, do Laboratório de Sensoriamento Remoto Aplicado à Agricultura e Floresta (LAF), do INPE. A erosividade mensal foi calculada de acordo com a equação proposta por Lombardi Neto e Moldenhauer (1992), e a erosividade anual correspondeu à soma dos valores mensais. Os dados de erosividade mensal e anual foram exportados, com as coordenadas, para o QGIS e interpolados usando o método *Inverse Distance Weighted* (IDW). Para a classificação dos níveis de erosividade, foi aplicado o algoritmo *r.recode* do GRASS. As classes seguiram Vidal e Silva Neto (2020), modificadas de acordo com o sistema métrico internacional (Foster et al., 1981): muito baixa, baixa, média, alta e muito alta.

Mapeamento da vulnerabilidade ecoambiental

A vulnerabilidade natural (VN) e a vulnerabilidade ambiental (VA) da BHTA foram definidas segundo a metodologia de vulnerabilidade à perda de solo, conforme Crepani et al. (2008). No SPRING, foram atribuídos pesos às classes de cada variável determinante de perturbação, utilizando-se os respectivos PI. A ponderação dos pesos das classes considerou os valores normalizados de vulnerabilidade, variando de 0 a 1 (Silva Neto, 2013a), em função do grau de vulnerabilidade ou estabilidade da área, das relações de morfogênese e pedogênese e das informações coletadas sobre a área de estudo (Tabela 1).

Tabela 1 - Bacia Hidrográfica do Tarumã-Açu: pesos atribuídos às classes de variáveis determinantes de perturbação usados para definir a vulnerabilidade ecoambiental, 2024

| Determinantes de perturbação | Classes | Peso | Fontes |
|------------------------------|---------------------------------|------|---|
| Uso e cobertura da terra | Água | 0.00 | Crepani <i>et al.</i> (2008) Serrão; Belato; Dias (2019) |
| | Área florestal | 0.20 | |
| | Área campestre | 0.30 | |
| | Área urbana | 0.80 | |
| | Área descoberta | 1.00 | |
| | Área de mineração | 1.00 | |
| Solos | Latossolo Amarelo | 0.20 | Crepani <i>et al.</i> (2008) |
| | Distrófico | | |
| | Latossolo Amarelo Ácrico | 0.20 | |
| | Gleissolo Háptico Tb Distrófico | 1.00 | |
| Geologia | Formação Alter do Chão | 0.85 | Riker <i>et al.</i> (2016) |
| | Formação Belterra | 1.00 | Crepani <i>et al.</i> (2008) |
| | Depósitos Aluvionares | 1.00 | Cunha <i>et al.</i> (1994) |
| Vulnerabilidade do relevo | Muito fraca | 0.20 | Silva Neto; Aleixo (2016) |
| | Fraca | 0.40 | |
| | Moderada | 0.60 | |
| | Forte | 0.80 | |
| | Muito forte | 1.00 | |
| Erosividade da chuva | Alta | 0.80 | Vidal; Silva Neto (2020) |
| | Muito alta | 1.00 | Silva Neto; Aleixo (2020) |

Organização: Os autores, 2024.

Para a ponderação dos valores de vulnerabilidade, utilizou-se a LEGAL (Farias; Sousa, 2015). A partir dos PI, com as classes ponderadas e seus respectivos pesos em modelo MNT, realizou-se a avaliação da importância de cada determinante de perturbação por meio do método AHP. A vulnerabilidade natural (VN) foi definida comparando-se os níveis de importância entre solos, geologia, vulnerabilidade do relevo e erosividade da chuva, conforme a Equação 1. Na definição da vulnerabilidade ambiental (VA), acrescentou-se à análise o uso e cobertura da terra (Equação 2). Para a VA, atribuiu-se peso 3 (algo melhor) em relação ao uso e cobertura da terra. A avaliação pareada retornou valores consistentes (< 0,10) de razão de consistência (RC = 0,008 para a VN e RC = 0,001 para a VA), de acordo com a definição de Saaty (1994).

$$VN = 0,087 * EC + 0,143 * G + 0,385 * VR + 0,385 * S \quad (1)$$

Em que: VN = vulnerabilidade natural; EC= erosividade da chuva; G = geologia; VR = vulnerabilidade do relevo; S = solo.

$$VA = 0,750 * VN + 0,250 * UCT \quad (2)$$

Em que: VA = vulnerabilidade ambiental; VN = vulnerabilidade natural; UCT = uso e cobertura da terra.

Após essa etapa, que subsidiou o mapeamento, realizou-se o cruzamento das informações obtidas, aplicando-se a álgebra de mapas para VN e VA, definindo-se os seguintes graus de vulnerabilidade: muito baixa, baixa, média, alta e muito alta.

Proposição de zonas ambientais

Para a proposição das zonas ambientais, a vulnerabilidade ambiental (VA) foi associada aos limites de áreas legalmente protegidas e/ou com fins de ordenamento existentes na bacia — Área de Proteção Ambiental Tarumã/Ponta Negra, Reserva Florestal Adolpho Ducke, Projeto de Assentamento Santo Antônio e Projeto de Assentamento Tarumã-Mirim. Os dados vetoriais das Unidades de Conservação

(UCs) e das áreas de assentamentos foram obtidos nos portais do Ministério do Meio Ambiente (MMA) e do Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (INCRA), respectivamente, sendo convertidos posteriormente para dados matriciais e exportados ao banco de dados do *SPRING*. Aplicou-se a ferramenta de fatiamento, convertendo o arquivo em dado temático e mantendo-se os limites originais das áreas.

A integração dos PI das unidades selecionadas com as classes de VA foi realizada por meio da álgebra de mapas, utilizando-se o módulo *LEGAL* do *SPRING*, com operação booleana (Câmara et al., 2001; Silva Neto, 2013a). Foram definidas as seguintes zonas: (i) preservação prioritária; (ii) uso sustentável; (iii) preservação e recuperação; (iv) desenvolvimento; e (v) recuperação. No Quadro 1, são apresentados os critérios selecionados para a proposição das zonas ambientais, considerando as áreas e os níveis de VA.

Quadro 1 - Critérios utilizados na definição das zonas ambientais

| Áreas vinculadas | Níveis de vulnerabilidade ambiental | Zona |
|---|---|---------------------------|
| Reserva florestal | Vulnerabilidade ambiental baixa e média | Preservação prioritária |
| Projetos de assentamentos | Vulnerabilidade ambiental baixa, média e alta | Uso sustentável |
| Área de proteção ambiental | Vulnerabilidade ambiental baixa, média, alta e muito alta | Preservação e recuperação |
| Setores inferior, médio e superior da bacia | Vulnerabilidade ambiental média e baixa | Desenvolvimento |
| | Vulnerabilidade ambiental alta | Recuperação |

Elaboração: Os autores, 2024.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Vulnerabilidade natural (VN)

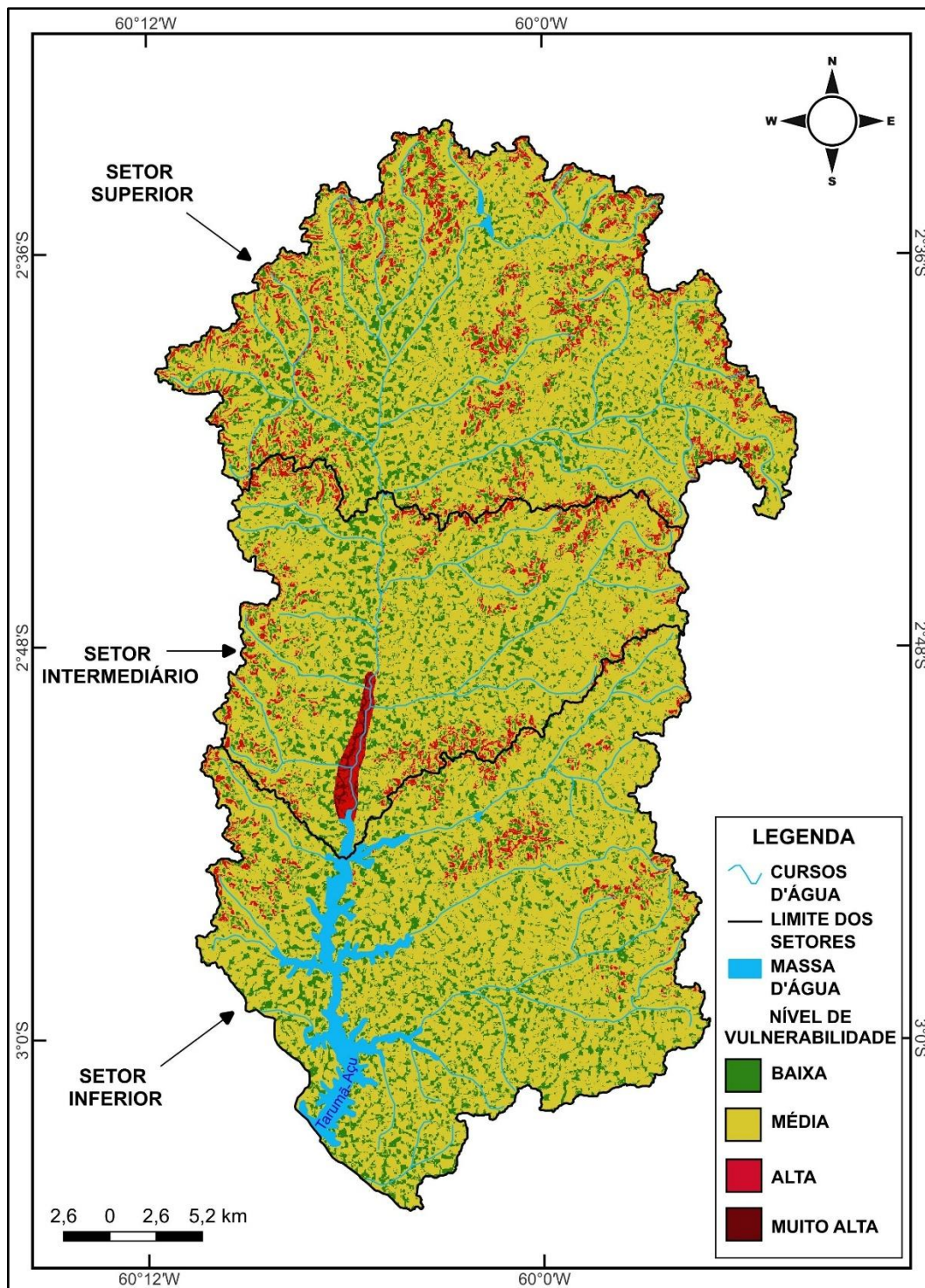
A partir do cruzamento dos mapas de geologia, solos, vulnerabilidade do relevo e erosividade anual, obteve-se a vulnerabilidade natural (VN) (Figura 2). Na BHTA, há predominância (74,03%) de níveis médios de VN, abrangendo 1.015,70 km² da área da bacia. Médios níveis de VN estiveram associados às unidades geológicas Alter do Chão, Formação Belterra e depósitos aluvionares (Riker et al., 2016); à erosividade alta; vulnerabilidade do relevo variando entre fraca e moderada; e solos do tipo Latossolo Amarelo. Esse tipo de solo apresenta baixa vulnerabilidade e, em condições naturais ou quando manejado de forma adequada, boa resistência aos processos erosivos (Oliveira Neto et al., 2015).

As áreas com baixos níveis de VN somam 274,97 km², o que corresponde a 20,03% da área total da bacia, e abrangem áreas sobre as formações Alter do Chão, Belterra e depósitos aluvionares (Riker et al., 2016), associadas às regiões com erosividade alta a muito alta, vulnerabilidade do relevo muito fraca e solos do tipo Latossolo Amarelo (ácrico e distrófico). Com predominância no setor inferior da bacia, essas áreas com baixa VN sugerem ambientes com elevada estabilidade ecodinâmica, onde prevalecem os processos de pedogênese. Dessa forma, tendem a ser mais resilientes após sofrerem alterações antrópicas, devido ao histórico evolutivo de sua paisagem (Guerrero et al., 2021).

Os ambientes com alta VN representam 79,56 km², o equivalente a 5,78% da área da bacia, ocorrendo principalmente nas bordas dos setores intermediário e superior da BHTA, em regiões da Formação Belterra e de depósitos aluvionares, sobre Latossolos Amarelos Ácricos e Gleissolos, com vulnerabilidade do relevo forte e muito forte. Apenas 2,56 km² da BHTA estão sujeitos a um nível muito alto de VN, restritos à região a montante da massa d'água, onde ocorrem depósitos aluvionares, em áreas com predominância de Gleissolos (solos mais vulneráveis à erosão em razão de suas características hidromórficas). De acordo com Lopes e Saldanha (2016), os depósitos aluvionares

indicam regiões instáveis, uma vez que apresentam areais, cascalheiras, siltitos e sedimentos de planícies sujeitas à inundação. A vulnerabilidade do relevo nessa região varia de moderada a forte.

Figura 2 - Bacia hidrográfica do Tarumã-Açu: vulnerabilidade natural (VN), 2024



Elaboração: Os autores, 2025.

Nas regiões com alta e muito alta VN, geralmente predominam os processos morfogenéticos, indicando áreas naturalmente hiperdinâmicas, que devem ser prioritárias para conservação, controle e recuperação ambiental.

Vulnerabilidade ambiental (VA)

A partir do cruzamento dos mapas de uso e cobertura da terra e de VN, estimou-se a vulnerabilidade ambiental (VA) na BHTA (Figura 3). Os resultados mostraram que 39,05% da área da bacia (536,07 km²) apresentam baixa VA. Essas regiões compreendem trechos com baixa, média ou alta VN, sendo os últimos relacionados às áreas de platôs. Na BHTA, a VA é baixa, principalmente nas áreas com cobertura florestal preservada, como Unidades de Conservação (UCs), Áreas de Preservação Permanente (APPs) e o setor superior da bacia, onde está localizado o Distrito Agropecuário da Suframa (DAS) (Costa, 2020b). Áreas com cobertura campestre, constituídas por vegetação secundária em diferentes estágios de sucessão ecológica, após sofrerem perturbações antrópicas e serem abandonadas (Costa, 2020b), bem como culturas agrícolas e pastagens que dependem de longos períodos de pousio — suficientemente longos para reposição de nutrientes e matéria orgânica perdidos no período agrícola (Vasconcelos, 2012) — também apresentam baixo nível de VA.

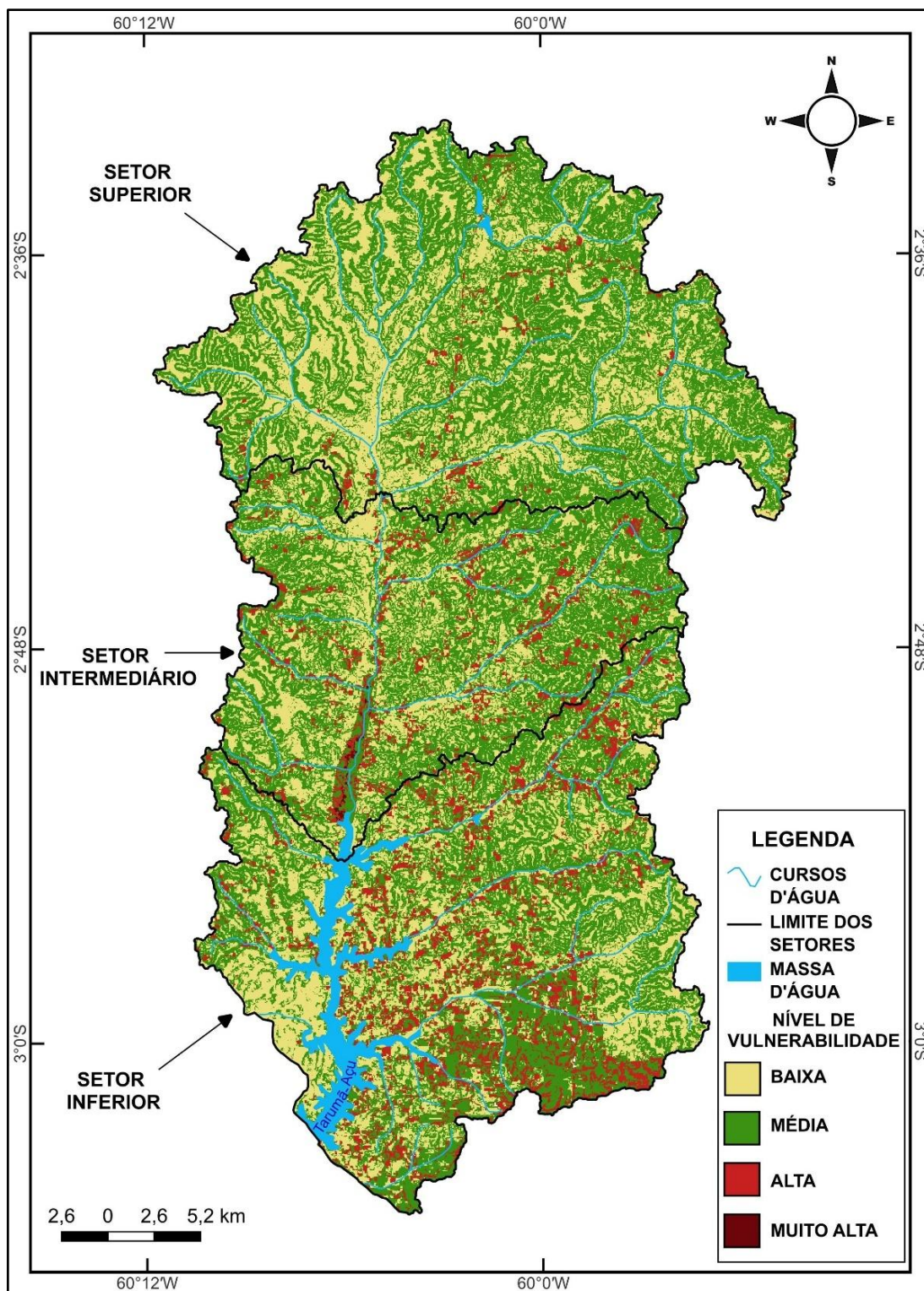
A maior parte da área mapeada, 728,49 km² (53,07%), apresentou nível médio de VA. Esses ambientes exibiram VN variando de baixa a alta, associada a diferentes usos e coberturas da terra, com certo equilíbrio entre os processos de pedogênese e morfogênese. No entanto, o uso desordenado da terra pode desequilibrar essa relação (Medeiros et al., 2018). Crimes ambientais, como desmatamento e extração ilegal de madeira e minerais, são comuns na BHTA, mesmo no entorno de UCs e APPs, sobretudo em locais com acesso à rodovia estadual, conforme apontam Costa et al. (2019).

Os ambientes com alta VA totalizaram 107,36 km², equivalentes a 7,82% da área total da BHTA, abrangendo trechos com VN média a muito alta e sem cobertura natural, com maior concentração no setor inferior da BHTA, onde a paisagem já foi bastante alterada para usos antrópicos (Costa et al., 2021b). As áreas sem cobertura estão geralmente relacionadas ao processo de expansão urbana, incluindo rodovias e estradas vicinais, atividades de mineração e desmatamento ilegal (Costa et al., 2021a; 2021b). Nessas áreas, verifica-se a presença de feições erosivas, sendo as voçorocas as incisões mais impactantes, resultantes do escoamento lateral e das interações entre as características físico-naturais da área (Vieira, 2008; Albuquerque; Vieira, 2014; Carvalho; Molinari, 2014; Frota Filho; Abreu; Vieira, 2020). Sem a proteção da cobertura vegetal, o solo torna-se vulnerável à ação da chuva (erosão hídrica). Considerando-se os altos índices anuais de precipitação, somados aos elevados índices de erosividade, há tendência de agravamento dos processos erosivos, com consequente intensificação do assoreamento dos corpos hídricos que formam a bacia (Bühning, 2010).

No setor superior da BHTA, apesar do maior grau de preservação (Costa et al., 2021a), foram identificadas áreas com alta VA, geralmente próximas aos ramais de acesso e às zonas de maior ocupação e perda da cobertura vegetal, decorrente de desmatamento e queimadas (Gama, 2019). Predominantes nos setores intermediário e inferior da BHTA, essas áreas são consideradas instáveis e estão fortemente associadas aos processos de morfogênese. O setor intermediário da bacia funciona como área de transição entre os ambientes urbano e rural. Os balneários configuram uma atividade turística e de lazer bastante frequente, levando à supressão florestal para criação ou ampliação de vias de acesso e instalação de infraestrutura de apoio às margens dos cursos d'água (Costa, 2020a; Costa, 2020b; Costa et al., 2021a).

No setor inferior, concentra-se a zona urbana da capital amazonense, além de parte significativa das atividades de mineração, principalmente relacionadas à extração de areia, o que eleva o nível de vulnerabilidade. Apesar do baixo potencial de poluição hídrica, a extração de areia nas proximidades dos corpos d'água aumenta o risco de assoreamento pelo aporte de sedimentos decorrentes dos processos erosivos, levando à redução da largura e da profundidade dos canais fluviais e à diminuição da vazão (Silva, 2016; Silva; Fortes; Delgado, 2020).

Figura 3 - Bacia hidrográfica do Tarumã-Açu: vulnerabilidade ambiental, 2024



Elaboração: Os autores, 2025.

No setor inferior da bacia, a intensificação e o desordenamento da expansão urbana constituem os principais *drivers* de piora do estado de conservação (Costa et al., 2021b), sobretudo em direção às zonas oeste e norte da bacia. Essa região passou a ser alvo de especulação imobiliária, fato que tem

contribuído para a abertura ou expansão de ramais de acesso (Damasceno, 2018). De acordo com Costa et al. (2020), a supressão da vegetação nativa e os impactos dela decorrentes derivam principalmente da implantação de empreendimentos imobiliários. Nesse sentido, os loteamentos representam parcela significativa das áreas desflorestadas, com tendência de aumento caso não sejam adotadas ações de controle ambiental (Nascimento, 2009).

Cobrindo uma área de 0,88 km² (0,06%), os ambientes com nível muito alto de VA correspondem às áreas que combinam VN muito alta e ausência de cobertura florestal. Para essas áreas, sugerem-se usos voltados à educação e interpretação ambiental, ao turismo sustentável, à conservação e à recuperação ambiental (Olimpio; Zanella, 2012). Nos níveis de VA alta e muito alta, predomina a morfogênese. Assim, os usos antrópicos da terra aceleram os processos erosivos e promovem impactos ambientais negativos diretos e indiretos (Ribeiro et al., 2016), acelerando o atingimento de um possível ponto de irreversibilidade sob a perspectiva da degradação de suas características naturais (Silva Neto; Aleixo, 2016).

Mapeamentos de vulnerabilidade ambiental como este apontam os locais com risco de novos processos erosivos e de degradação dos recursos hídricos, indicando áreas prioritárias para conservação e/ou para implementação de medidas mitigadoras, dando suporte à gestão dos recursos naturais da bacia (Pinese Júnior; Rodrigues, 2012). Embora a BHTA apresente majoritariamente níveis baixos a médios de VA, essa qualidade ambiental é ameaçada pelo aumento da degradação da paisagem natural da bacia, que tem se intensificado em direção aos setores mais preservados, como a cabeceira (Costa, 2020a; Costa et al., 2021b).

Zonas ambientais

As zonas ambientais propostas foram definidas a partir do cruzamento do mapeamento da vulnerabilidade ambiental (VA) com as áreas legalmente protegidas e destinadas ao ordenamento da BHTA, sendo estabelecidas as seguintes zonas ambientais: (i) zona de preservação prioritária (ZPP); (ii) zona de desenvolvimento (ZD); (iii) zona de uso sustentável (ZUS); (iv) zona de preservação e recuperação (ZPR); e (v) zona de recuperação (ZR), conforme Figura 4.

Zona de preservação prioritária (ZPP)

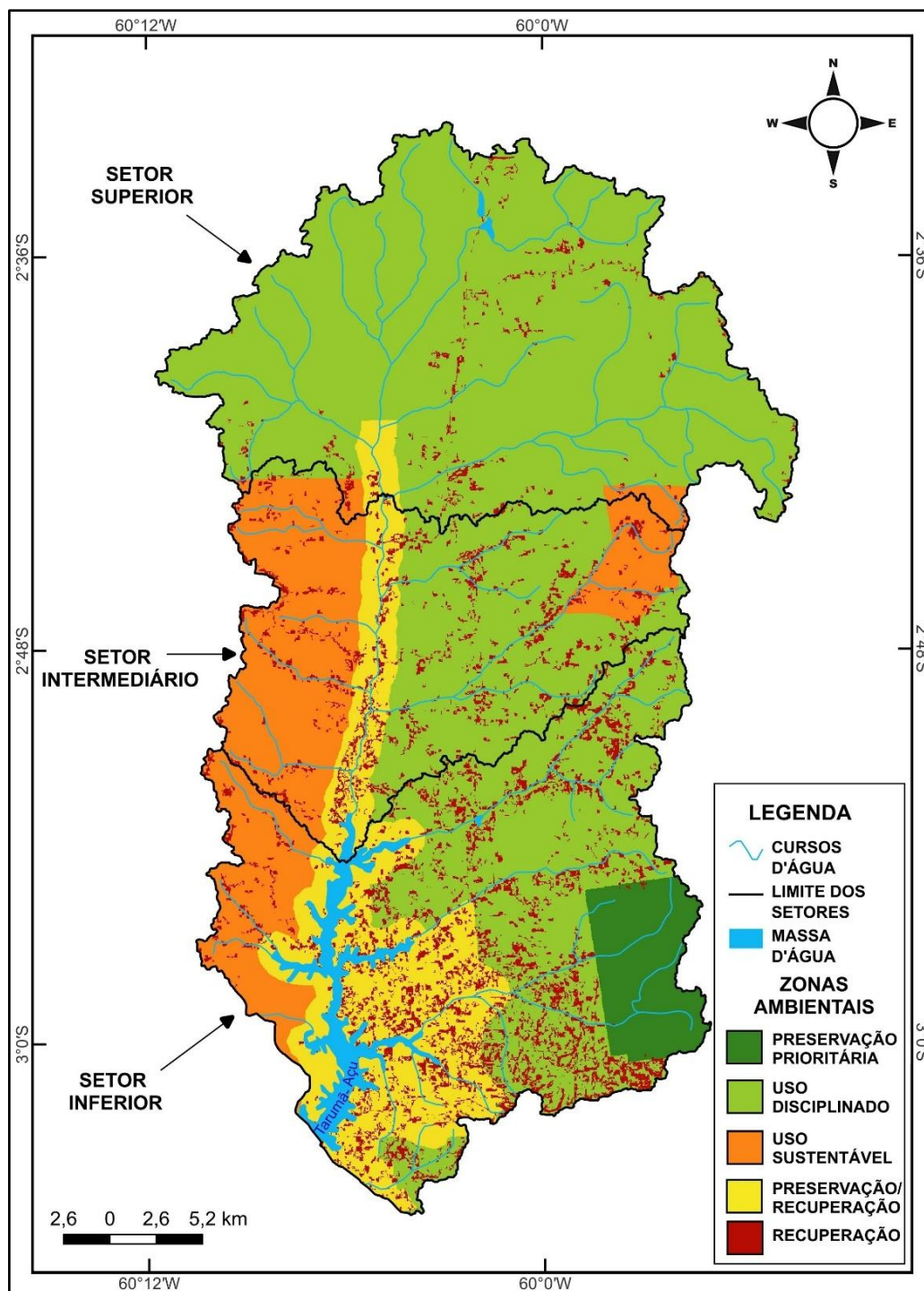
A ZPP abrange 3,79% da área total da bacia (52,04 km²), e seus limites coincidem com os da Reserva Florestal Adolpho Ducke (RFAD), que apresenta níveis de vulnerabilidade ambiental variando de baixo a médio. Alguns dos tributários da BHTA nascem e/ou cruzam a RFAD, como os igarapés do Acará da Bolívia. Para Fajardo et al. (2010), a forte pressão exercida pela expansão urbana e industrial tende a transformar a RFAD em um grande fragmento florestal isolado. Os efeitos da urbanização no entorno da RFAD têm provocado alterações na qualidade dos recursos hídricos, principalmente nos cursos d'água dentro da reserva ou naqueles que nascem fora e escoam para seu interior (Ferreira et al., 2012).

Portanto, é fundamental ordenar o processo de expansão urbana em todos os setores das bacias, visando contribuir para a manutenção da qualidade ambiental de seus ecossistemas. Considerada aqui como prioritária para a preservação, essa zona requer ações de monitoramento da qualidade dos recursos hídricos e de contenção do desmatamento e da mineração ilegal.

Zona de desenvolvimento (ZD)

Na BHTA, a ZD proposta corresponde a 823,80 km², o equivalente a 60,01% da área total da bacia, incluindo áreas com baixa a média vulnerabilidade ambiental. Com potencial para o desenvolvimento de atividades agrícolas e pecuárias, essa zona apresenta também algumas limitações, como a existência de unidades com grande instabilidade ambiental — as zonas de recuperação —, o que indica a necessidade de medidas de conservação (Tagliani, 2016). Essa zona concentra-se, em sua maior parte, na margem esquerda do Rio Tarumã-Açu, abrangendo quase todo o setor superior da bacia, incluindo o Distrito Agropecuário da Suframa (DAS), sendo primordial o desenvolvimento de práticas de gestão e manejo sustentáveis.

Figura 4 - Bacia hidrográfica do rio Tarumã-Açu: zonas ambientais, 2025



Elaboração: Os autores, 2025.

Zona de uso sustentável (ZUS)

A delimitação proposta para as zonas de uso sustentável considerou os limites do Projeto de Assentamento Santo Antônio (PA Santo Antônio), localizado na transição entre os setores intermediário e superior da bacia, e do Projeto de Assentamento Tarumã-Mirim (PA Tarumã-Mirim), situado nos setores inferior e intermediário, com exceção das áreas que se sobrepõem à APA Tarumã/Ponta Negra.

As ZUS somam 209,47 km², o equivalente a 15,26% da BHTA, abrangendo regiões com baixa, média e alta vulnerabilidade ambiental.

As áreas com alta VA apresentam solos bastante degradados em razão dos tipos de uso. Portanto, é importante que sejam incentivadas ações de recuperação dos solos e de restauração da cobertura vegetal. Mesmo as regiões com baixa a média VA requerem a criação e o fortalecimento de medidas de conservação das Áreas de Preservação Permanente (APPs) e Reservas Legais (RLs), bem como o apoio às práticas de manejo sustentável nas áreas agrícolas.

Embora as áreas que compõem as ZUS tenham sido criadas, inicialmente, para o desenvolvimento da agricultura familiar, há grande potencial para exploração de atividades de lazer comercial, com aproveitamento não consuntivo dos recursos hídricos. De acordo com Demetrio e Barbosa (2018), essa atividade representa um novo paradigma de subsistência com sustentabilidade no âmbito da agricultura familiar nos projetos de assentamento.

Zona de preservação e recuperação (ZPR)

Delimitada com base na APA Tarumã/Ponta Negra, a ZPR ocupa 223,38 km², o equivalente a 16,26% da área da bacia, abrangendo áreas com baixa, média, alta e muito alta VA. A vulnerabilidade alta a muito alta dentro da ZPR está associada à expansão urbana, sobretudo para uso imobiliário e infraestrutura de apoio ao turismo. A perda de florestas aumenta a vulnerabilidade dos solos aos processos erosivos, principalmente nas APPs.

Apesar da existência da APA Tarumã/Ponta Negra, a ZPR também concentra a maior parte das unidades com grande instabilidade, associadas às características naturais da BHTA. Isso evidencia o descumprimento dos objetivos da APA, o que deve ser corrigido mediante ordenamento da ocupação e efetiva implementação das políticas de gestão e conservação dos recursos naturais, com ênfase nas APPs, além do monitoramento da qualidade da água.

Zona de recuperação (ZR)

Distribuídas por toda a BHTA, as ZRs totalizam 64,20 km² (4,68%) e correspondem às áreas com alta VA e grande instabilidade, relacionadas à ausência de cobertura vegetal e aos usos urbano e minerário, com intensa degradação dos solos. Muitas dessas ZRs estão situadas nas APPs de alguns tributários, sendo mais numerosas no setor inferior da bacia.

A maior vulnerabilidade dessas zonas aos processos erosivos exige a proposição e implementação de medidas de estabilização dos solos e de recuperação das áreas degradadas, bem como a atenuação de processos ambientais considerados negativos para os solos e os recursos hídricos. As larguras mínimas das faixas de APPs estabelecidas pelo Novo Código Florestal (Lei nº 12.651/2012) precisam ser respeitadas, uma vez que a vegetação ao longo dos rios tem a função de preservar os recursos hídricos e a paisagem da bacia, além de proteger os solos contra a erosão (Brasil, 2012).

As APPs, portanto, desempenham papel relevante na estabilidade desses ambientes, agregando serviços ecossistêmicos fundamentais — o que é incompatível com a permissividade para alterações em sua cobertura vegetal (Kominoski et al., 2013; Carvalho Neto, 2020).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O levantamento de informações dos meios físico e antrópico foi fundamental para a análise integrada da bacia. Por meio da metodologia de vulnerabilidade à perda de solos, foram identificadas e avaliadas as vulnerabilidades natural e ambiental, demonstrando-se um recurso importante para a análise das áreas estáveis e instáveis da BHTA. Os resultados das análises de vulnerabilidade foram essenciais na definição das zonas ambientais, destacando a importância do mapeamento para a gestão dos recursos hídricos.

Em relação às categorias morfodinâmicas analisadas, os mapeamentos realizados apontaram o predomínio dos meios intermediários, ou seja, equilíbrio entre pedogênese e morfogênese. Quanto à VN, há predomínio do nível médio de vulnerabilidade, especialmente no setor inferior da BHTA. A

geologia local, associada aos tipos de solo e à alta erosividade, favorece o surgimento de processos erosivos, especialmente quando há gestão inadequada dos usos da terra.

As áreas com nível médio de VA concentram-se no setor superior da bacia e apresentam níveis de VN de baixo a alto, associados à densa cobertura florestal. Apesar do predomínio de áreas com VA baixa a média, a forte pressão da expansão urbana e de atividades econômicas em direção à região da cabeceira, com redução da cobertura florestal, pode levar à perda da qualidade ambiental e à elevação dos níveis de VA.

A avaliação da vulnerabilidade ecoambiental, fundamentada nos critérios utilizados, mostrou-se útil na proposição de zonas ambientais que podem subsidiar estratégias de conservação e recuperação na BHTA. Nossa avaliação evidencia que a proteção dos recursos hídricos da bacia requer uma mudança de paradigma, com a adoção de um modelo de gestão que considere os impactos das perturbações naturais e antropogênicas. Esses dados são essenciais para o adequado planejamento e gestão do uso sustentável dos recursos naturais da bacia, com vistas a garantir a disponibilidade e a qualidade da água na BHTA.

REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, A. R. C.; VIEIRA, A. F. S. G. Erosão dos solos na Amazônia. In: GUERRA, A.J.T.; OLIVEIRA JORGE, M.C. **Degradação dos solos no Brasil**. 1. ed.- Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2014, p.223-254.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, M. J. L.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. <http://dx.doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- ANFUSO, G.; POSTACCHINI, M.; DI LUCCIO, D.; BENASSAI, G. Coastal sensitivity/vulnerability characterization and adaptation strategies: a review. **J. Mar. Sci. Eng.**, v.9, n, 72, 2021. <https://doi.org/10.3390/jmse9010072>
- ARIAS, P. A. *et al.* Changes in normalized difference vegetation index in the Orinoco and Amazon River basins: Links to tropical Atlantic surface temperatures. **J. Clim.**, v. 33, p. 8537-8559, 2020. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0696.1>
- BRASIL. Lei n. 12.651, de 25 maio de 2012. **Código Florestal Brasileiro**. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nos 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nos 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória no 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm Acesso em: 10 abr. 2024.
- BROWNING, T. N.; SAWYER, D. E. Vulnerability to watershed erosion and coastal deposition in the tropics. **Scientific Reports**, v.11, n. 885, 2021. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-79402-y>
- BÜHRING, R. **Estudo da dinâmica de uso do solo e cobertura vegetal e elaboração de uma proposta de zoneamento para a bacia hidrográfica do Tarumã, Manaus, Amazonas**. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais e Ambientais) – Manaus: UFAM, 2010. Disponível em: <http://tede.ufam.edu.br/handle/tede/3007>. Acesso em: 19 jul, 2025.
- BUSMAN, D. V.; AMARO, V. E.; SOUSA-FILHO, P. W. M. Análise estatística multivariada de métodos de vulnerabilidade física em zonas costeiras tropicais. **Rev. Bras. Geomorfol.** (Online), São Paulo, v.7, n. 3, p. 499-516, 2016. <http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v17i3.912>
- CÂMARA, G.; BARGOSA, C.; CORDEIRO, J. P.; LOPES, E.; FREITAS, U. M.; LUCENA. Álgebra de mapas, *In*: CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V. **Introdução à Ciência da Geoinformação**. São José dos Campos. INPE-10506- RPQ/249, 2001. 221- 240 p. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/>. Acesso em: 20 de jul. 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**, v. 14, n. 3, p. 323-330, 2013. <http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v14i3.430>
- CARVALHO, D. P.; MOLINARI, D. C. Caracterização das voçorocas na BR-174: trecho Manaus – Presidente Figueiredo (Amazonas). **Rev. Geogr. Acadêmica**, v. 8, n. 2, p. 5-19, 2014.
- CARVALHO NETO, L. M. Uso e ocupação do solo da Área de preservação permanente (APP) da microbacia do Córrego Barreiro, Uberaba (Minas Gerais). **Revista Brasileira de Sensoriamento Remoto**, v. 1, n. 2, p. 29-41, 2020.
- CHOUDHARY, K.; BOORI, M. S.; KUPRIYANOV, A. Spatial modelling for natural and environmental vulnerability through remote sensing and GIS in Astrakhan, Russia. **The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science**, v.21, p.139-147, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2017.05.003>
- COLARES, I. S.; FERREIRA JUNIOR, J. C.; RODRIGUES, L. de S.; MAIA, S. A.; WACHHOLZ, F. Suscetibilidade do solo à erosão na bacia Hidrográfica do rio Tarumã-Açu (Amazonas-Brasil). **Caminhos de Geografia**, v. 23, n. 89, p. 367–389, 2022. <https://doi.org/10.14393/RCG238960655>
- COSTA, B. S. M.; LIMA, A. V.; SOUZA NETA, N. L.; PINTO, F. R. Environmental Crimes in the Environmental Preservation Area (EPA) Adolpho Ducke in the city of Manaus-AM. **International Journal of Advanced Engineering Research and Science (IJAERS)**, v. 6, p.261-266, 2019. <https://dx.doi.org/10.22161/ijaers.611.40>
- COSTA, J. S.; RODRIGUES, L. S.; MENDONÇA, M. R. M.; MELO, M. A. G.; LIBERATO, M. A. R. Environmental diagnosis of the lower course of the Gigante river basin (Amazonas-Brazil). **Ci. e Nat.**, v. 42, e97, 2020. <https://doi.org/10.5902/2179460X40562>
- COSTA, J. S. **Potenciais impactos da transformação da paisagem para a gestão da bacia hidrográfica do Tarumã-Açu**. Dissertação (Mestrado em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos) Manaus: UEA. 2020a. Disponível em: <https://pos.uea.edu.br/data/area/dissertacao/download/44-1.pdf>. Acesso em: 05 de ago. 2025.
- COSTA, J. S. **Relatório de situação da bacia hidrográfica do Tarumã-Açu** [livro eletrônico]: transformações antrópicas e qualidade da água. 1 ed. Manaus, AM: Ed. do Autor, 2020b. Disponível em: <https://pos.uea.edu.br/data/area/dissertacao/download/44-2.pdf>. Acesso em: 04 de ago. 2025.
- COSTA, J. S.; RODRIGUES, L. S.; SILVA, A. G. C.; REIS, T. C.; MELO, M. G. G. M.; LIBERATO, M. A. R. Estado de conservação e qualidade da água em uma bacia hidrográfica periurbana na Amazônia Central. **Scientia Plena**, [S. l.], v. 17, n. 9, 2021a. <https://doi.org/10.14808/sci.plena.2021.091701>
- COSTA, J. S.; RODRIGUES, L. S.; SILVA, A. G. C.; REIS, T. C.; MELO, M. G. G.; LIBERATO, M. A. R. L. Forest fragmentation and its potential implications for the management of the Tarumã-Açu River basin, Central Amazon, Brazil. **RBCIAMB**, v.56, n.2, p. 209-222, 2021b. <https://doi.org/10.5327/Z21769478975>
- CREPANI, E.; MEDEIROS, J. S.; PALMEIRA, A. F.; SILVA, E. F. Zoneamento Ecológico Econômico. In: FLORENZANO, T.G. **Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008, p. 285-318.
- CUNHA, P. R. C.; GONZAGA, F. G.; COUTINHO, L. F. C.; FEIJÓ, F. J. Bacia do Amazonas. Rio de Janeiro: **Boletim Geológico Petrobras**, v.8, n. 01, p.47-55, 1994. Disponível em: <https://bqp.petrobras.com.br/bqp/article/view/580>. Acesso em: 4 de ago. 2025
- DAMASCENO, S. B. Reestruturação do Comitê de Bacia Hidrográfica do Rio Tarumã-Açu: Comitê e Bacia. **Dissertação** (Mestrado em Gestão e Regulação de Recurso Hídricos) – Manaus: UEA. 2018. Disponível em: <https://pos.uea.edu.br/data/area/dissertacao/download/35-16.pdf>. Acesso em: 6 de ago. 2025.
- DE LIMA, L. S.; SILVA, F. E. O.; ANASTÁCIO, P. R. D.; KOLANSKI, M. M. P.; PEREIRA, A. C. P.; MENEZES, M.S.R. *et al.* Severe droughts reduce river navigability and isolate communities in the

Brazilian Amazon. **Communications Earth & Environment**, v. 5, n. 370, 2024.

<https://doi.org/10.1038/s43247-024-01530-4>

DEMETRIO, A. M. V. BARBOSA, R. M. S. P. Processo civilizador e as configurações cegas no Projeto de Assentamento Tarumã Mirim. **REVES – Revista Relações Sociais**, v. 1, n. 1, p. 89-100, 2018. . <https://doi.org/10.18540/revesv11iss1pp0089-0100>

ESPINOZA, J. C. *et al.* Recent changes in the atmospheric circulation patterns during the dry-to-wet transition season in south tropical South America (1979-2020): Impacts on precipitation and fire season. **J. Clim.**, v. 34, p. 9025-9042, 2021. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-21-0303.1>

ESPINOZA, J. C.; JIMENEZ, J. C.; MARENGO, J. A.; SCHONGART, J.; RONCHAIL, J.; LAVADO-CASIMIRO, W.; RIBEIRO, J. V. The new record of drought and warmth in the Amazon in 2023 related to regional and global climatic features. **Sci. Rep.**, v.14, n. 8107, 2024. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-58782-5>

FAJARDO, J. D. V.; FERREIRA, S. J. F.; MIRANDA, S. A. F.; MARQUES FILHO, A. O. Características hidrológicas do solo saturado da Reserva Florestal Adolpho Ducke – Amazônia Central. **Revista Árvore**, v.34, n.4, p.677-684, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622010000400012>

FARIAS, A. F. G.; SOUSA, R. F. Utilização de Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algébrico no Cálculo do NDVI do Município de João -Pessoa-PB. **Revista Principia**, n. 20, p. 47-57, 2015. <http://dx.doi.org/10.18265/1517-03062015v1n20p47-57>

FERREIRA, S. J. F.; MIRANDA, S. A. F.; MARQUES FILHO, A. O.; SILVA, C. C. Efeito da pressão antrópica sobre igarapés na Reserva Florestal Adolpho Ducke, área de floresta na Amazônia Central. **Acta Amazonica**, v. 42, n. 2, p.533-540, 2012. <https://doi.org/10.1590/S0044-59672012000400011>

FOSTER, G. R; MCCOOL, D. K; RENARD, K. G.; MOLDENHAUER, W. C. Conversion of the universal soil loss equation to SI metric units. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 36, n. 6, p. 355-359, 1981. <https://doi.org/10.1080/00224561.1981.12436140>

FROTA FILHO, A. B.; ABREU, N. R. P.; VIEIRA, A. F. S. G. Processo de voçorocamento e feições secundárias: um estudo de caso em Manaus – AM. **Revista Caminhos de Geografia**, v.21, n.74, p.313-323, 2020. <https://doi.org/10.14393/RCG217441778>

GAMA, C. S. Análise da situação fundiária de lotes rurais localizados nas estradas vicinais ZF-1 e ZF-2 e diagnóstico socioeconômico do ramal ZF-1, inseridos no Distrito Agropecuário da Suframa, para subsidiar a tomada de ação para o monitoramento ambiental da região. *In*: RODRIGUES, T.A.; LEANDRO NETO, J. **Práticas de produção agrícola e conservação ambiental**. Ponta Grossa, PR: Atena Editora, 2019, p.79-103.

GARNIER, A.; PENNEKAMP, F., LEMOINE, M.; PETCHEY, O. L. Temporal scale dependent interactions between multiple environmental disturbances in microcosm ecosystems. **Glob Change Biol.**, v. 23, p.5237-5248, 2017. <https://doi.org/10.1111/gcb.13786>

GATTI, L.V. *et al.* Amazonia as a carbon source linked to deforestation and climate change. **Nature**, v. 595, p. 388-393, 2021. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03629-6>

GUERRERO, J. V. R.; PESTANA, L. F. A.; SOARES, J. A. H.; RUIZ, I. H.; MOSCHINI. Carta de vulnerabilidade natural como instrumento de apoio ao Zoneamento Ecológico-Econômico do município de Pirassununga (São Paulo). **Revista Brasileira de Sensoriamento Remoto**, v. 2, n.2, p.25-42, 2021. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5548230>

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Manual técnico de uso da terra. *In*: **Manuais Técnicos de Geociências**. 3. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2013. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo>. Acesso em: 3 de mar. 2025.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Banco de Dados de Informações Ambientais**. 2019. Disponível em: <https://bdiaweb.ibge.gov.br/#/home>

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Adamantina, São Paulo. São José dos Campos: INPE. **Catálogo de Imagens**. Imagem de satélite 27 de julho de 2016. Satélite Landsat-8 OLI. Disponível em: <http://www.dgi.inpe.br>. Acesso em: 15 mar. 2020.

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **SPRING**: Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas. 2021a. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/spring/>. Acesso em: 25 de abr. de 2021.

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **TOPODATA**: Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil. 2021b. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/topodata/acesso.php>. Acesso em: 21 de abr. 2021.

JIMENEZ, J. C.; MIRANDA, V.; TRIGO, I.; LINONATI, R.; ALBUQUERQUE, R.; PERES, L. F. *et al.* Vegetation warming and greenness decline across Amazonia during the extreme drought of 2023. **Remote Sensing**, v. 16, 2519, 2024. <https://doi.org/10.3390/rs16142519>

KLAIS, T. B. A.; DALMAS, F. B.; MORAIS, R. P.; ATIQUE, G.; LASTORIA, G.; PARANHOS FILHO, A. Vulnerabilidade natural e ambiental do município de Ponta Porã, Mato Grosso do Sul, Brasil. **Revista Ambiente & Água**, v. 7, n. 2, p. 277-290, 2012. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.786>

KOMINOSKI J. S.; JOHN, J. S.; SHAH, J.J. F.; CANHOTO, C.; FISCHER, D. G.; GILING, D. P.; GONZÁLEZ, E.; GRIFFITHS, N. A.; LARRAÑAGA, A.; LEROY, C. J.; MINEAU, M.M.; MCELARNEY, Y. R.; SHIRLEY, S. M.; SWAN, C. M.; TIEGS, S. D. Forecasting functional implications of global changes in riparian plant communities. **Frontiers in Ecology and the Environment**, v. 11, n. 8, p. 423 – 432, 2013. <https://doi.org/10.1890/120056>

KÖPPEN, W. Das geographische System der Klimate. In: KÖPPEN, W.; GEIGER, R. **Handbuch der Klimatologie**. Gebrüder Bornträger, v.1, p. 1-44, part C. Berlin, 1936.

LANDIS, J. R.; KOCH, G. G. The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. **Biometrics**, v. 33, n. 1, p. 159-174, 1977.

LOMBARDI NETO, F.; MOLDENHAUER, W. C; Erosividade da chuva: sua distribuição e relação com perdas de solo em Campinas, SP. **Bragantia**, Campinas, v. 51, n. 2, p. 189-196, 1992. <https://doi.org/10.1590/S0006-87051992000200009>.

LOPES, M. S.; SALDANHA, D. L. Análise de vulnerabilidade natural à erosão como subsídio ao planejamento ambiental do oeste da bacia hidrográfica do Camaquã-RS. **Revista Brasileira de Cartografia**, v.68, n. 9, 2016. <https://doi.org/10.14393/rbcv68n9-44437>

MAMANI, L.; ANDREOLI, R. V.; DE SOUZA, I. P.; CEVALHO, W.; SALES, D.; KAYANO, M.T.; DE SOUZA, R. A. F.; MOLINA-CARPIO, J.; CERON, W. L.; MACEDO, T. Extreme droughts in the Amazon Basin during cyclic ENSO events coupled with Indian Ocean Dipole modes and Tropical North Atlantic warming. **Science of the Total Environment**, v. 963, 178596, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.178536>

MARENGO, J. A.; JIMENEZ, J. C.; ESPINOZA, J. C.; CUNHA, A. P.; ARAGÃO, L. E. O. Increased climate pressure on the new agricultural frontier in the eastern Amazonia-Cerrado transition zone. **Sci. Rep.**, v. 12, n. 457, 2022. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-04241-4>

MARENGO, J. A.; CUNHA, A. P.; EXPINOZA, J. C.; FU, R.; SCHONGART, J.; JIMENEZ, J. C.; COSTA, M. C.; RIBEIRO, J. M.; WONGCHUIG, S. Z. The drought of Amazonia in 2023-2024. **American Journal of Climate Change**, v. 13, n. 3, p. 567-597, 2024. <https://doi.org/10.4236/ajcc.2024.133026>

MATERANO, L. S.; BRITO, J. L. S. Fragilidade ambiental potencial da bacia hidrográfica do rio Castán, estado Trujillo – Venezuela. **Revista Caminhos de Geografia**, v. 21, n. 73, p. 86-97, 2020. <https://doi.org/10.14393/RCG217347216>

MEDEIROS, I. S.; FREIRES, J. L.; DANTAS, M. S.; ALMEIDA N. V. Ecodinâmica e vulnerabilidade ambiental de uma sub-bacia inserida em uma Área de Proteção Ambiental. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 3, n. 3, p. 296-309, 2018. <https://doi.org/10.24221/jeap.3.3.2018.1985.296-309>

NASCIMENTO, J. L. A. **Uso de geotecnologia no monitoramento de unidades de conservação**: Ocupações periurbanas na APA Margem Esquerda do Rio Negro. Dissertação (Mestrado em Ciências do Ambiente e Sustentabilidade na Amazônia) – Manaus: UFAM. 2009. Disponível em: <https://tede.ufam.edu.br/handle/tede/2604>. Acesso em: 25 de mar. 2025.

NGUYEN, A. K.; LIOU, Y. A.; LI, M. H.; TRAN, T. A. Zoning eco-environmental vulnerability for environmental management and protection. **Ecol. Indic.**, v.69, p.100-117, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.03.026>

NGUYEN, K-A; LIOU, Y-A. Global mapping of eco-environmental vulnerability from human and nature disturbances. **Science of the Total Environment**, v. 664, p. 995-1004, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.407>

OLÍMPIO, J. L. S.; ZANELLA, M. E. Emprego das tecnologias da geoinformação na determinação das vulnerabilidades natural e ambiental do município de Fortaleza/CE. **Revista Brasileira de Cartografia**, n.74, v.1, p. 1-14, 2012. <https://doi.org/10.14393/rbcv64n1-43772>

OLIVEIRA, P. T. S.; RODRIGUES, D. B.; ALVES SOBRINHO, T.; PANACHUKI, E. Processo analítico hierárquico aplicado a vulnerabilidade natural a erosão. **Revista Geociências**, v. 28, n. 4, p. 417-424, 2009.

OLIVEIRA, B. S.; MATAVELI, G. V. Avaliação do desempenho dos classificadores Iseog e Bhattacharya para mapeamento de áreas de cana-de-açúcar nos municípios de Barretos -SP. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16., 2013, Foz do Iguaçu. **Anais [...]**. São José dos Campos: INPE, 2013, p. 89-96.

OLIVEIRA NETO, M. B. de; NASCIMENTO, A. F. do; MARQUES, F. A.; AMARAL, A. J. do; HERNANI, L. C.; CUNHA, T. J. F. Contribuição Ao Estudo De Solos Frágeis Na Região Semiárida – Petrolina, PE. In: CASTRO, S. S. de; HERNANI, L. C. **Solos Frágeis: Caracterização, Manejo E Sustentabilidade**. 1. ed. Brasília, DF: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa Solos. 2015. p. 111- 134.

PINESE JÚNIOR, J. F.; RODRIGUES, S. C. O Método de Análise Hierárquica – AHP – como auxílio na determinação da vulnerabilidade ambiental da bacia hidrográfica do rio Piedade (MG). **Revista do Departamento de Geografia**, [S.l.], v. 23, p. 4-26, 2012. <https://doi.org/10.7154/RDG.2012.0023.0001>

QGIS Development Team. **QGIS Geographic Information System**. Open Source Geospatial Foundation Project. 2021. Disponível em: <http://qgis.osgeo.org/>. Acesso em: 22 de fev. 2021.

RIBEIRO, A. S.; MINCATO, R. L.; CURI, N.; KAWAKUBO, F.S. Vulnerabilidade ambiental à erosão hídrica em uma sub-bacia hidrográfica pelo processo analítico hierárquico. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 09, n. 01, p. 016-031, 2016. <https://doi.org/10.26848/rbqf.v9.1.p016-031>

RIKER, S. R. L.; LIMA, F. J.C.; MOTTA, M. B.; SILVA, D.P. B. **Geologia e recursos minerais da região metropolitana de Manaus, Estado do Amazonas**: escala de integração 1:500.000. Manaus: CPRM, 2016. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/17852>. Acesso em: 5 de ago. 2025.

SAATY, T.L. How to Make a Decision: The Analytic Hierarchy Process. **Interfaces**, v. 24, n. 6, p. 19-43, 1994. <http://dx.doi.org/10.13128/Aestimium-7138>

SARGES, R. R.; SILVA, T. M.; RICCOMINI, C. Caracterização do relevo da região de Manaus, Amazônia Central. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 12, n.1, p. 95-104, 2011. <http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v12i1.222>

SERRÃO, S. L. C.; BELATO, L. S.; DIAS, R. P. A vulnerabilidade natural e ambiental do município de Belém (PA). **Nature and Conservation**, v.12, n.1, p. 36-45, 2019. <https://doi.org/10.6008/CBPC2318-2881.2019.001.0004>.

SILVA NETO, J. C. A. Avaliação da vulnerabilidade à perda de solos na bacia do rio Salobra, MS, com base nas formas do terreno. **Geografia (Londrina)**, v.22, n.1, p.05-25, 2013a. <http://dx.doi.org/10.5433/2447-1747.2013v22n1p05>

SILVA NETO, J.C.A. **Zoneamento ambiental como subsídio para o ordenamento do território da bacia hidrográfica do rio Salobra, Serra da Bodoquena – MS**. Tese (Doutorado em Geografia). Presidente Prudente: UNESP, 2013b. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/105078>. Acesso em: 22 de mar. 2025.

- SILVA NETO J. C. A.; ALEIXO, N. C. R. Análise temporal da vulnerabilidade da paisagem à perda dos solos na bacia hidrográfica do Rio Salobra – Serra da Bodoquena, Mato Grosso do Sul. **Revista Formação (Online)**, v. 2, n. 23, p.252-270, 2016. <https://doi.org/10.33081/formacao.v2i23.3740>
- SILVA NETO, J. C.; ALEIXO, N. C. Erosividade da chuva na região do médio Solimões, Amazonas, Brasil. **Caminhos de Geografia**, v. 21, n. 77, p.01-17, 2020. <https://doi.org/10.14393/RCG217747117>
- SILVA, J. R. C. **Impactos ambientais da exploração de areai na microbacia do Igarapé do Mariano no município de Manaus - AM**. Jundiá, Paco Editorial: 2016
- SILVA, M. F.; FORTES, M. R.; DELGADO, M. B. C. A extração irregular de areia e os impactos ambientais no Ramal Água Preta/Areal, zona rural de Manaus – AM. **Revista Ciência Geográfica**, v. 24, n. 2, p.684-697, 2020.
- TAGLIANI, C. R. Zoneamento Ecológico-Econômico da zona sula do Estado do Rio Grande do Sul. **Desenvolv. Meio Ambiente**, v. 38, p. 303-324, 2016. <http://dx.doi.org/10.5380/dma.v38i0.46044>
- TRICART, J. **Ecodinâmica**. Rio de Janeiro: FIBGE/SUPREN, 1977, 91p.
- TURNER, B. L.; KASPERSON, R. E.; MATSON, P. A.; McCARTHY, J. J.; CORELL, R. W.; CHRISTENSEN, L.; ECKLEY, N.; KASPERSON, J. X.; LUERS, A.; MARTELLO, M. L.; POLSKY, C.; PULSIPLHER, A.; SCHILLER, A. A framework for vulnerability analysis in sustainability science. **PNAS**, v.100, n.14, p.8074-8079, 2003. <https://doi.org/10.1073/pnas.1231335100>
- USGS - United States Geological Survey. **Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)**, 1 Arc-Second Global. 2021. Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov>. Acesso em: 15 de mar. 2021.
- VASCONCELOS, M.A. **Estudo da paisagem do setor sul da bacia hidrográfica do Tarumã-Açu, Manaus, utilizando imagens multipolarizadas do radar ALOS/PALSAR**. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais e Ambientais) – Manaus: UFAM. 2012. Disponível em: <https://tede.ufam.edu.br/handle/tede/4747>. Acesso em: 13 de mar. 2025.
- VIDAL, B. S.; SILVA NETO, J. C. Análise do potencial erosivo da bacia hidrográfica do Igarapé Cacaú Pirêra, Iranduba, Amazonas, Brasil. **Geosaberes**, v. 11, p. 711-727, 2020. <https://doi.org/10.26895/geosaberes.v11i0.962>
- VIEIRA, A. F. G. **Desenvolvimento e distribuição de voçorocas em Manaus (AM): principais fatores controladores e impactos ambientais**. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis: UFSC. 2008. Disponível em: <http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/91352>. Acesso em: 4 de ago. 2025.
- XIA, M.; JIA, K.; ZHAO, W.; LIU, S.; WEI, X.; WANG, B. Spatio-temporal changes of ecological vulnerability across the Qinghai-Tibetan Plateau. **Ecological Indicators**, v. 123, 107274, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107274>

Recebido em: 25/03/2025

Aceito para publicação em: 02/09/2025