



CANAIS DE ORDEM ZERO: CONTRIBUIÇÕES PARA O MANEJO NA APA DO RIO PIAVA, UMUARAMA-PR

Jonathan Santos Pericinato¹
Fernando Luis de Paula Santil²
Solimara Aparecida Tertuliano³

Resumo: A Estação da Bacia Hidrográfica do Rio Piava, em Umuarama (PR), é a única fonte de abastecimento público do município, beneficiando mais de 100 mil pessoas e assumindo, assim, um papel fundamental para a sustentabilidade da cidade. Embora de importância estratégica para a segurança hídrica regional, a bacia está sob a influência de pressões antropogênicas relacionadas à expansão urbana, à produção pecuária predominante, à compactação do solo, à remoção da vegetação ribeirinha e ao aumento dos processos erosivos. Os canais de ordem zero desempenham um papel importante ambientalmente, uma vez que são áreas de convergência de fluxos superficiais e subsuperficiais, e associam-se frequentemente às zonas temporárias de saturação hídrica, às áreas úmidas e ao início de processos erosivos de incisão. O objetivo do estudo foi avaliar a utilização de geotecnologias e índices morfométricos para a identificação desses canais na APA do Rio Piava, em especial por meio do Índice Topográfico de Umidade (ITU) e do Índice de Fluxo Máximo (IMF) – este último derivado do Modelo Digital de Terreno processado no QGIS e no SAGA GIS. Foram observadas diferenças entre as cartas topográficas oficiais na escala 1:50.000 e o que foi representado por geoprocessamento e validação em campo, evidenciando a subestimação dos sítios naturalmente vulneráveis. Conclui-se que a inclusão dos canais de ordem zero no planejamento ambiental é crucial para revisão das margens vegetacionais, para a mitigação do assoreamento e para a consolidação da gestão integrada do manancial.

Palavras-chave: Gestão ambiental; bacia hidrográfica; geotecnologia; índices.

ZERO-ORDER CHANNELS: CONTRIBUTIONS TO MANAGEMENT IN THE PIAVA RIVER ENVIRONMENTAL PROTECTED AREA, UMUARAMA, PARANÁ

Abstract: *The Piava River Watershed Station, in Umuarama (Paraná) is the only source of public water supply for the municipality, benefiting more than 100,000 people and thus assuming a fundamental role in the city's sustainability. Although strategically important for regional water security, the watershed is under the influence of anthropogenic pressures related to urban expansion, predominant livestock production, soil compaction, riparian vegetation removal, and the intensification of erosive processes. Zero order channels play an environmentally relevant role, as they are areas of convergence of surface and subsurface flows are often associated with temporary zones of water saturation, wetlands, and the onset of incision erosive processes. The aim of the study was to evaluate the use of geotechnologies and morphometric indices for identifying these channels in the Piava River Environmental Protection Area (APA), particularly through the Topographic Wetness Index (TWI) and the Maximum Flow Index (MFI) – the latter derived from the Digital Terrain Model processed in QGIS and SAGA GIS. Differences were observed between official topographic maps at the 1:50,000 scale and what was represented through geoprocessing and field validation, highlighting the underestimation of naturally vulnerable sites. It is concluded that the inclusion of zero-order channels in environmental planning is crucial for reviewing vegetative margins, for the mitigation of siltation and for the consolidation of integrated watershed management.*

Keywords: *Environmental management; watershed; geotechnology; indices.*

1 Introdução

Os canais de ordem zero correspondem a feições hidrológicas temporárias ou efêmeras

¹ Doutorando em Geografia (PGE). Universidade Estadual de Maringá (UEM). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6563-3867>. Lattes: <http://lattes.cnpq.br/3733746952784057>. E-mail: jpericinato@gmail.com.

² Doutorado em Ciências Geodésicas (UFPR). Professor do Instituto de Geografia, Geociências e Saúde Coletiva no Curso de Engenharia de Agrimensura e Cartográfica da Universidade Federal de Uberlândia/Campus de Monte Carmelo – MG. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1165-2165>. Lattes: <http://lattes.cnpq.br/4188463042348168>. E-mail: fernando.santil@ufu.br.

³ Doutoranda em Geografia (PGE). Universidade Estadual de Maringá (UEM). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3093-9196>. Lattes: <http://lattes.cnpq.br/5651029320562305>. E-mail: solitertuliano@gmail.com.



localizadas a montante dos canais de primeira ordem, formadas pela convergência do escoamento superficial e subsuperficial em áreas de cabeceira. Essas feições representam zonas de transição entre processos de vertente e processos fluviais, sendo ativadas principalmente durante eventos de chuva intensa ou em períodos de maior saturação do solo. Segundo Silva et al. (2024), canais efêmeros e cabeceiras de drenagem têm recebido atenção crescente em estudos de gestão de bacias, pois influenciam diretamente a conectividade hidrológica e o transporte inicial de sedimentos. Embora nem sempre apresentem leito definido ou fluxo permanente, exercem função relevante na transferência de água, sedimentos e solutos das encostas para a rede de drenagem (Silva; Kobiyama, 2004).

A importância dos canais de ordem zero tem sido ampliada no debate ambiental recente, especialmente diante da intensificação de eventos extremos de precipitação, da expansão de usos agropecuários sobre áreas sensíveis e da necessidade de aprimorar instrumentos de planejamento territorial. Estudos recentes sobre conectividade hidrosde sedimentos, sensoriamento remoto e modelagem digital do terreno têm demonstrado que as cabeceiras de drenagem são áreas fundamentais para a regulação hídrica, produção de sedimentos e manutenção da qualidade da água em bacias hidrográficas. Os índices topográficos derivados de modelos digitais de terreno são ferramentas importantes para reconhecer zonas de saturação e áreas de maior conectividade hidrológica em bacias de cabeceira. Nessa perspectiva, a identificação de canais efêmeros, áreas úmidas temporárias e zonas de saturação torna-se relevante para a gestão de mananciais, sobretudo em bacias utilizadas para abastecimento público (Schlesner, 2022; Souza; Castelo Branco, 2020).

Na APA da Bacia Hidrográfica do Rio Piava, em Umuarama, Paraná, essa discussão assume relevância particular, pois o Rio Piava constitui o principal manancial superficial de abastecimento público do município. A bacia apresenta fragilidades naturais associadas à presença de solos arenosos e arenitos da Formação Caiuá, além de pressões antrópicas relacionadas à predominância de pastagens, compactação do solo, supressão de vegetação ripária, estradas rurais e expansão urbana. Segundo Bento, Ribeiro e Kopp (2025), alterações no uso da terra em bacias brasileiras podem modificar a resposta hidrológica, ampliando a erosão, o escoamento superficial e a carga de sedimentos. Esses fatores podem intensificar o escoamento superficial, a erosão linear, o transporte de sedimentos e o assoreamento do canal principal (Pericinoto, 2021; Bento; Ribeiro; Kopp, 2025).

Apesar de sua importância, os canais de ordem zero geralmente não aparecem representados nas cartas topográficas oficiais, especialmente em escalas médias como 1:50.000. Essa ausência gera uma lacuna entre a dinâmica hidrológica real da bacia e os instrumentos formais de planejamento ambiental, que tendem a considerar apenas cursos d'água permanentes, intermitentes ou nascentes pontuais. Conforme Bortolin, Mendes e Caneppele (2021), o uso de



geotecnologias tem se mostrado essencial para complementar bases cartográficas tradicionais, sobretudo em estudos que demandam maior detalhamento espacial. Com isso, áreas hidrologicamente ativas e ambientalmente vulneráveis podem permanecer sem proteção adequada quando não são analisadas por métodos morfométricos e geoespaciais (Bortolin; Mendes; Caneppele, 2021).

Diante desse contexto, este estudo tem como objetivo avaliar a aplicação de geotecnologias e índices morfométricos na identificação de áreas potenciais de ocorrência de canais de ordem zero na APA da Bacia Hidrográfica do Rio Piava. Para tanto, foram utilizados o Índice Topográfico de Umidade e o Índice de Máximo Fluxo, associados à análise do Modelo Digital do Terreno, dados de uso e cobertura da terra e validação em campo. Segundo Ribeiro et al. (2021), a integração entre modelagem hidrológica, análise espacial e validação empírica fortalece a interpretação dos processos ambientais em bacias hidrográficas. Busca-se, assim, contribuir para o aprimoramento da gestão ambiental da APA e para a proteção do manancial utilizado no abastecimento público de Umuarama (Pericinoto, 2021).

2 Bacia hidrográfica, conectividade hidrológica e canais de ordem zero.

A bacia hidrográfica constitui uma unidade físico-territorial adequada para o planejamento ambiental e a gestão dos recursos hídricos, pois integra processos climáticos, geomorfológicos, pedológicos, hidrológicos e antrópicos. Alterações ocorridas em vertentes, áreas de recarga, nascentes e cabeceiras podem repercutir em toda a rede de drenagem, influenciando a vazão, a qualidade da água, o transporte de sedimentos e a estabilidade dos canais. Segundo Costa, Dupas e Pons (2020), a avaliação da fragilidade ambiental em bacias hidrográficas deve considerar a interação entre características naturais e formas de uso da terra, pois é dessa combinação que emergem os principais conflitos ambientais. Por essa razão, o manejo de bacias exige abordagem sistêmica, capaz de considerar tanto os canais fluviais mapeados quanto as áreas de contribuição que condicionam seu funcionamento (Christofoletti, 1980; Costa; Dupas; Pons, 2020).

A rede de drenagem tradicionalmente é representada por sistemas de ordenamento hierárquico, como o método de Strahler, no qual canais de primeira ordem são aqueles que não possuem tributários mapeados. Embora amplamente utilizado em estudos geomorfológicos e hidrológicos, esse modelo apresenta limitações quando aplicado às cabeceiras, pois tende a desconsiderar feições difusas, efêmeras ou temporariamente conectadas à rede hidrográfica. De acordo com Souza e Castelo Branco (2020), a interpretação da conectividade geomorfológica em paisagens tropicais exige atenção às formas discretas de ligação entre encostas, canais e áreas de deposição. É justamente nesse intervalo entre a vertente e o canal de primeira ordem que se inserem



os canais de ordem zero (Strahler, 1952; Strahler, 1957; Souza; Castelo Branco, 2020).

Os canais de ordem zero são feições localizadas no início da rede de drenagem, frequentemente associadas a concavidades, depressões alongadas, áreas úmidas temporárias, sulcos incipientes e zonas de exfiltração. Sua ativação depende da combinação entre precipitação, umidade antecedente, capacidade de infiltração, declividade, área de contribuição e condições de uso do solo. Os índices de umidade topográfica contribuem para reconhecer setores onde a saturação do solo pode aumentar a conectividade entre áreas de cabeceira e canais fluviais. Em períodos secos, essas feições podem permanecer pouco evidentes; durante eventos chuvosos, entretanto, podem atuar como caminhos preferenciais de escoamento e transporte de sedimentos (Beven; Kirkby, 1979; Schlesner, 2022).

A noção de conectividade hidrológica é central para compreender a importância dessas feições. A conectividade expressa o grau em que diferentes compartimentos da paisagem — como vertentes, estradas, áreas agrícolas, zonas úmidas e canais — estão funcionalmente ligados pelo fluxo de água e sedimentos. Segundo Almeida e Correa (2020), a conectividade de sedimentos em bacias agrícolas pode intensificar a transferência de partículas do solo para os cursos d'água, principalmente quando há baixa cobertura vegetal e práticas conservacionistas insuficientes. Em bacias submetidas a uso agropecuário, a compactação do solo, a redução da cobertura vegetal e a presença de estradas rurais podem aumentar essa conectividade, criando rotas preferenciais de escoamento em direção aos canais de ordem zero e, posteriormente, ao canal principal (Bracken; Croke, 2007; Almeida; Correa, 2020).

Estudos recentes sobre gestão de bacias e resiliência hídrica têm reforçado que áreas de cabeceira, zonas ripárias e drenagens efêmeras desempenham funções ambientais essenciais, como retenção de sedimentos, amortecimento de cheias, recarga hídrica, filtragem de poluentes e manutenção da biodiversidade aquática e terrestre. A desconsideração de canais efêmeros em políticas de manejo pode comprometer a interpretação dos fluxos de água e sedimentos em bacias submetidas a mudanças climáticas e alterações no uso da terra. Dessa forma, a proteção de cursos d'água permanentes, embora necessária, não é suficiente para garantir a integridade hidrológica da bacia, sendo necessário incorporar as áreas de geração e concentração inicial do escoamento (Silva et al., 2024).

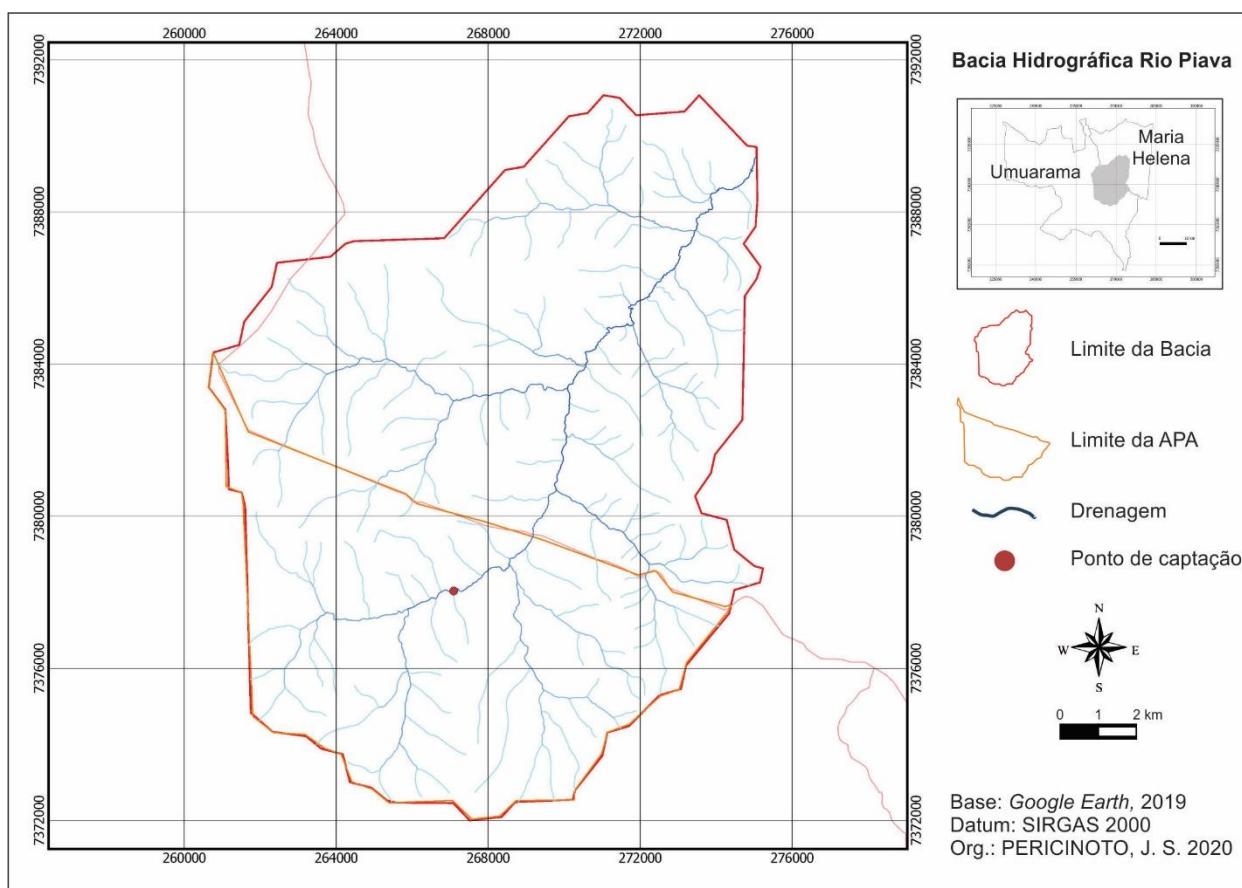
No Brasil, a legislação ambiental estabelece critérios de proteção para Áreas de Preservação Permanente associadas a cursos d'água, nascentes, veredas e áreas úmidas. Entretanto, a aplicação dessas normas muitas vezes depende da identificação cartográfica ou visual de feições hídricas permanentes ou claramente definidas. As mudanças no uso da terra podem ampliar de forma expressiva as taxas de erosão, demonstrando a necessidade de instrumentos preventivos de manejo em áreas ambientalmente frágeis. Esse aspecto pode limitar a proteção de

canais efêmeros e áreas úmidas temporárias, mesmo quando desempenham função hidrológica relevante (Brasil, 2012; Sampaio; Passos; Alves, 2024).

3 Caracterização da área de estudo

A área em estudo é a APA da Bacia Hidrográfica do Rio Piava, localizada no noroeste do estado do Paraná, tendo como foco principal o município de Umuarama e, em menor intensidade, o município de Maria Helena, como pode ser observado na figura 1.

Figura 1 – localização da APA do Rio Piava



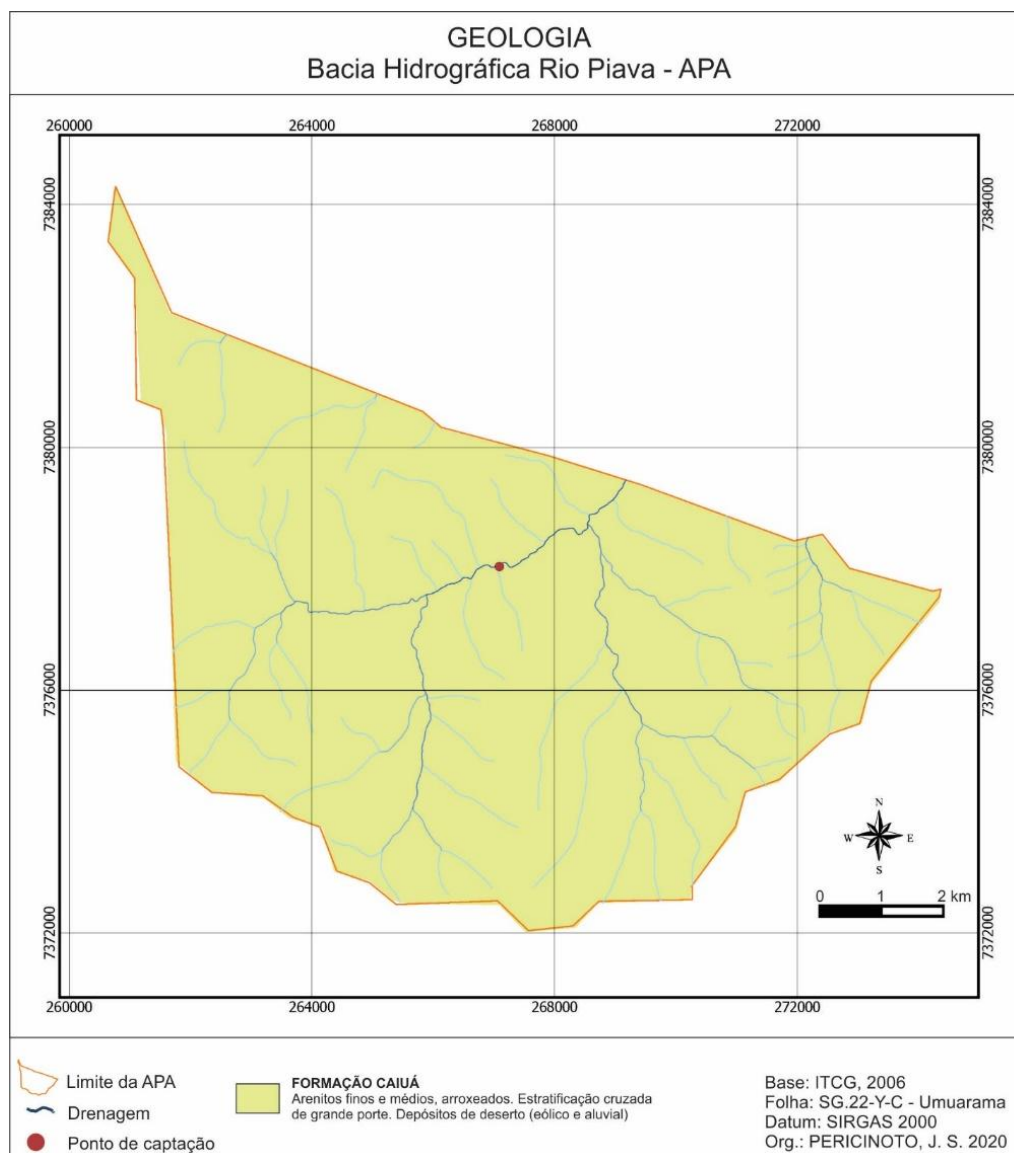
Fonte: Pericinoto, 2021.

O Rio Piava possui importância estratégica por constituir o principal manancial superficial utilizado no abastecimento público de Umuarama, atendendo população superior a 100 mil habitantes. Segundo Tundisi e Tundisi (2008), a conservação de mananciais exige articulação entre proteção ambiental, controle do uso do solo e gestão integrada dos recursos hídricos. Essa condição torna a conservação da bacia essencial para a segurança hídrica municipal, especialmente diante de eventos climáticos extremos, como estiagens prolongadas e chuvas intensas (Pericinoto, 2021; Tundisi; Tundisi, 2008).

A APA do Rio Piava foi criada com a finalidade de disciplinar o uso do solo e proteger os recursos naturais vinculados ao manancial. Inicialmente instituída pelo Decreto Municipal nº 050/1998, a unidade foi posteriormente ampliada pela Lei Municipal nº 3.849/2012, passando a abranger aproximadamente 8.344,66 hectares. De acordo com Costa, Dupas e Pons (2020), unidades territoriais submetidas a múltiplos usos necessitam de diagnósticos ambientais que identifiquem áreas de maior fragilidade e conflitos entre conservação e produção. Por se tratar de uma unidade de conservação de uso sustentável, atividades econômicas são permitidas, desde que compatíveis com os objetivos de conservação, o que torna necessário maior controle das áreas de cabeceira, encostas e zonas de contribuição direta (Costa; Dupas; Pons, 2020; Pericinoto, 2021).

Geologicamente, a bacia situa-se numa zona de arenitos da Formação Caiuá, que integra o Grupo Bauru, como mostra a figura 2.

Figura 2 – Mapa geológico da APA



Fonte: Pericinoto, 2021



Do ponto de vista físico-natural, a bacia está inserida no domínio de arenitos da Formação Caiuá, pertencente ao Grupo Bauru. Esses materiais apresentam textura predominantemente arenosa e baixa coesão, características que favorecem a desagregação e o transporte de partículas quando o solo se encontra exposto ou submetido a manejo inadequado. Segundo Almeida, Panachuki e Oliveira (2018), a produção de sedimentos em bacias brasileiras está fortemente associada à combinação entre erodibilidade do solo, uso inadequado da terra e ausência de práticas conservacionistas. A cobertura pedológica é composta principalmente por Latossolos Vermelhos e Argissolos Vermelho-Amarelos, além de ocorrências localizadas de solos arenosos e áreas com influência hidromórfica, condição que pode favorecer fluxos laterais subsuperficiais e concentração de umidade em setores específicos da paisagem (Santos et al., 2018; Almeida; Panachuki; Oliveira, 2018).

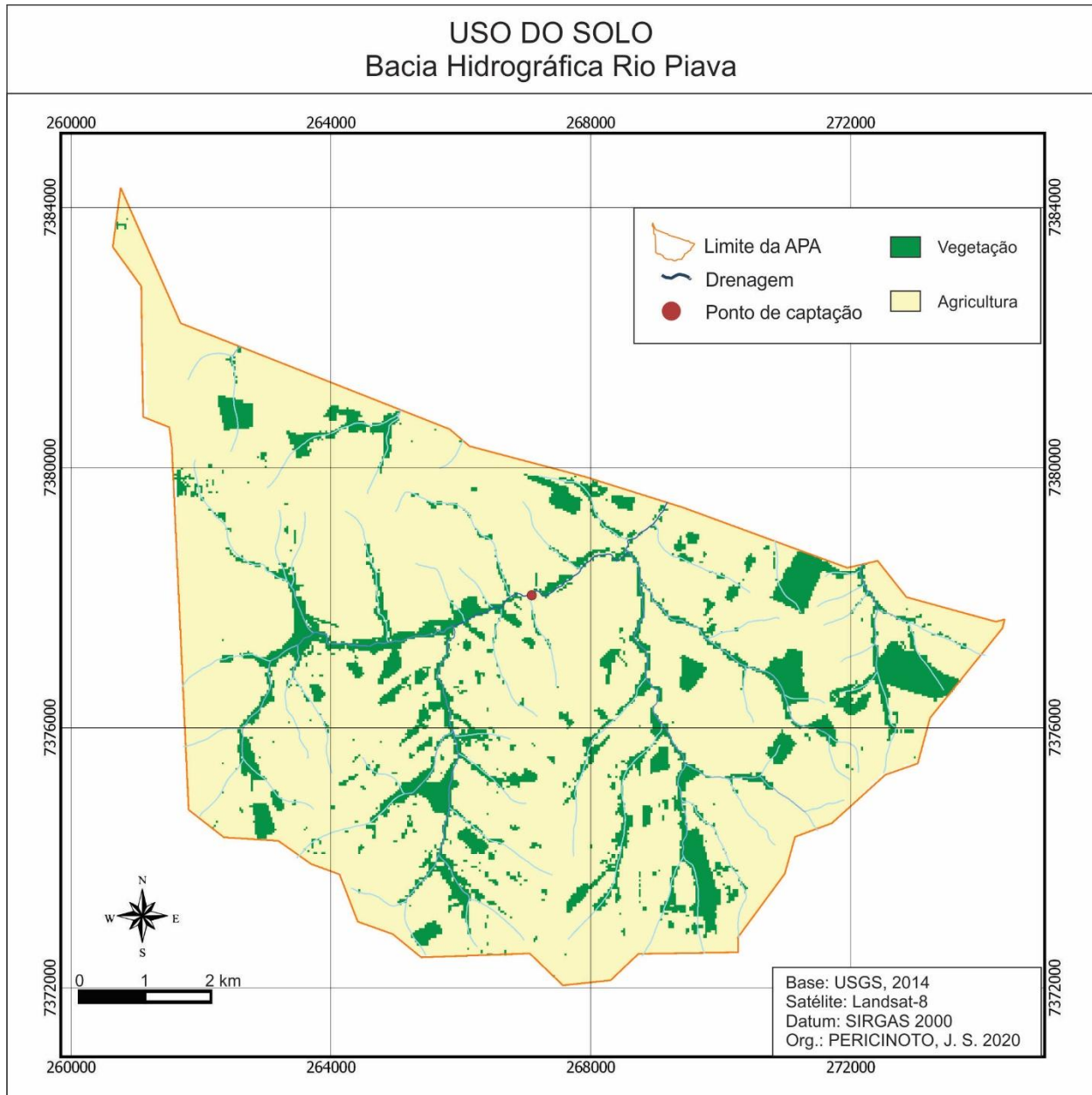
O clima regional é classificado como subtropical úmido, com precipitação média anual próxima de 1.670 mm e temperatura média em torno de 22 °C. Embora as chuvas ocorram ao longo do ano, há maior concentração no período de primavera e verão, o que favorece a saturação temporária de solos em áreas de cabeceira, fundos de vale e concavidades. Conforme Silva et al. (2020), a erosividade das chuvas e a vulnerabilidade hidrológica em bacias brasileiras são fatores essenciais para compreender a resposta do terreno à precipitação e ao transporte de sedimentos. Em eventos de chuva intensa, essas áreas podem apresentar rápida expansão do escoamento, aumentando a conectividade entre vertentes e canais fluviais (Silva et al., 2020; Pericinoto, 2021).

A geomorfologia local é caracterizada por relevo predominantemente suave-ondulado, com presença de vertentes longas, setores côncavos e transições entre média e baixa encosta. Ainda que as declividades não sejam elevadas em grande parte da bacia, a forma das vertentes e a convergência topográfica contribuem para a concentração do fluxo hídrico. As áreas de cabeceira, a convergência topográfica pode ser tão relevante quanto a declividade na definição de zonas úmidas temporárias e caminhos preferenciais de escoamento. Essa característica é fundamental para a identificação de canais de ordem zero, pois essas feições tendem a ocorrer em áreas onde a água se acumula ou converge antes da formação de canais mais definidos (Schlesner, 2022).

A malha de drenagem do Rio Piava apresenta padrão hierárquico típico de bacias médias, sendo o curso d'água principal do rio um canal de quinta ordem de acordo com Strahler. Todavia, a representação convencional tende a valorizar cursos d'água mais definidos, omitindo feições efêmeras ou temporárias nas nascentes. Esse é um ponto central para o presente trabalho, visto que canais de ordem zero simplesmente não são indicados em cartas topográficas oficiais, porém, desempenham uma função muito importante na consciência hidrológica e de sedimentação da bacia (Pericinoto, 2021).

O uso e cobertura do solo são dominados por pastagens, seguidos de agricultura e fragmentos de vegetação nativa, como mostra a figura 3.

Figura 3 – Uso e cobertura da terra



Fonte: Pericinoto, 2021

O uso e cobertura da terra são marcados pela predominância de pastagens, seguidas por áreas agrícolas e fragmentos de vegetação nativa. A presença de pastagens sobre áreas hidrológicamente sensíveis pode intensificar a compactação superficial devido ao pisoteio animal, reduzir a infiltração e aumentar o escoamento superficial. As alterações de cobertura vegetal e expansão de usos agropecuários podem elevar significativamente as taxas de erosão, especialmente quando ocorrem sobre solos vulneráveis. Quando associada a solos arenosos e à



ausência de vegetação ripária adequada, essa condição favorece a erosão linear, o transporte de sedimentos e o assoreamento do Rio Piava (Pericinoto, 2021; Sampaio; Passos; Alves, 2024).

Assim, a região em estudo revela a presença de uma mescla de elementos naturais e antropogênicos, que motivam o emprego de geotecnologias para o estudo da dinâmica hidrológica. A existência de substrato arenoso, o relevo com áreas de convergência, a precipitação concentrada, o uso agropecuário dominante e a dependência direta do manancial impõem a necessidade de identificar áreas hidrológicamente sensíveis. Nesse sentido, os canais de ordem zero adquirem uma importância ambiental estratégica, pois identificam regiões onde a rede de drenagem se forma ou se expande temporalmente, atuando diretamente com os processos de erosão, infiltração e carga de sedimentos.

4 Materiais e métodos

A metodologia foi estruturada em cinco etapas principais: organização da base geoespacial, geração do Modelo Digital do Terreno, cálculo dos índices morfométricos, cruzamento espacial com uso e cobertura da terra e validação em campo. Essa sequência permitiu identificar áreas com maior tendência à saturação hídrica, maior energia de escoamento e maior probabilidade de ocorrência de canais de ordem zero na APA da Bacia Hidrográfica do Rio Piava. Segundo Ribeiro et al. (2021), a integração entre modelagem espacial, dados ambientais e validação empírica amplia a confiabilidade das análises aplicadas ao manejo de bacias hidrográficas.

Inicialmente, foi organizada uma base de dados em ambiente de Sistema de Informação Geográfica, utilizando o software QGIS, versão 3.4, com apoio dos módulos GRASS GIS e SAGA GIS. Foram incorporadas cartas topográficas na escala 1:50.000, dados hidrográficos, limites da APA, informações geológicas e pedológicas, além de imagens orbitais Landsat-8/OLI. De acordo com Bortolin, Mendes e Caneppele (2021), o uso de geotecnologias na gestão de bacias possibilita integrar dados de múltiplas fontes e gerar diagnósticos espaciais mais compatíveis com a complexidade ambiental. Todas as camadas foram reprojatadas para o mesmo sistema de referência espacial, recortadas pelo limite da área de estudo e verificadas quanto à consistência topológica (Bortolin; Mendes; Caneppele, 2021).

O Modelo Digital do Terreno foi elaborado a partir das curvas de nível das cartas topográficas, com equidistância vertical de 20 metros. A interpolação foi realizada em ambiente GRASS GIS, gerando uma matriz *raster* com resolução espacial de 10 metros. A qualidade do modelo digital de terreno influencia diretamente a estimativa de índices topográficos, sobretudo em áreas de baixa declividade e cabeceiras difusas. Após a geração do modelo, foram realizados procedimentos de correção hidrológica, como preenchimento de depressões espúrias e ajuste da



continuidade do fluxo, a fim de reduzir inconsistências no cálculo da direção e acumulação de fluxo (Schlesner, 2022).

Para representar a distribuição do escoamento sobre a superfície, foram utilizados algoritmos de direção de fluxo disponíveis no SAGA GIS, com preferência por métodos de direção múltipla, adequados a áreas de relevo suave-ondulado. Esse tipo de algoritmo permite distribuir o fluxo para mais de uma célula vizinha, reduzindo a concentração artificial típica de métodos de direção única. Conforme Ribeiro et al. (2021), a escolha adequada do algoritmo de fluxo é decisiva para representar processos hidrológicos em bacias com relevo pouco dissecado. Essa escolha foi considerada importante para a identificação de áreas úmidas difusas, cabeceiras côncavas e canais incipientes (Ribeiro et al., 2021).

A identificação de áreas com maior propensão à saturação hídrica foi realizada por meio do Índice Topográfico de Umidade, calculado pela relação entre a área de contribuição específica e a declividade local. A equação utilizada foi:

$$ITU = \ln \left(\frac{A_c}{\tan \beta} \right)$$

Em que A_c representa a área de contribuição específica e β representa a declividade local expressa em radianos. Segundo Beven e Kirkby (1979), esse índice permite estimar áreas variáveis de contribuição e setores com maior probabilidade de saturação. Estudos recentes também reforçam sua utilidade na identificação de áreas úmidas, cabeceiras hidrologicamente ativas e zonas de conectividade superficial e subsuperficial (Schlesner, 2022).

O potencial erosivo associado ao escoamento concentrado foi estimado por meio do Índice de Máximo Fluxo, equivalente ao Stream Power Index. A equação empregada foi:

$$IMF = A_c \cdot \tan \beta$$

Na equação, A_c representa a área de contribuição específica e β corresponde à declividade local em radianos. Valores elevados de IMF indicam setores onde o fluxo apresenta maior energia para remover, transportar e depositar sedimentos. As áreas de maior conectividade sedimentológica em bacias agrícolas tendem a coincidir com rotas preferenciais de escoamento e transporte de partículas. Esses locais foram interpretados como áreas com maior potencial de formação de sulcos, ravinas e canais erosivos incipientes (Almeida; Correa, 2020).

Após o cálculo dos índices, os mapas de ITU e IMF foram classificados em faixas relativas de baixa, média e alta suscetibilidade, com base na distribuição estatística dos valores obtidos para a área de estudo. Em seguida, foi realizado o cruzamento espacial entre os índices, a rede hidrográfica oficial, as cartas topográficas e o mapa de uso e cobertura da terra. De acordo com



Costa, Dupas e Pons (2020), a sobreposição de variáveis ambientais é uma estratégia adequada para identificar áreas de fragilidade e subsidiar decisões de manejo. Foram consideradas áreas potenciais de ocorrência de canais de ordem zero aquelas que apresentaram valores médios a elevados de ITU, conexão topográfica com canais de primeira ordem, forma linear ou convergente e ausência de representação como curso d'água permanente nas bases oficiais (Costa; Dupas; Pons, 2020).

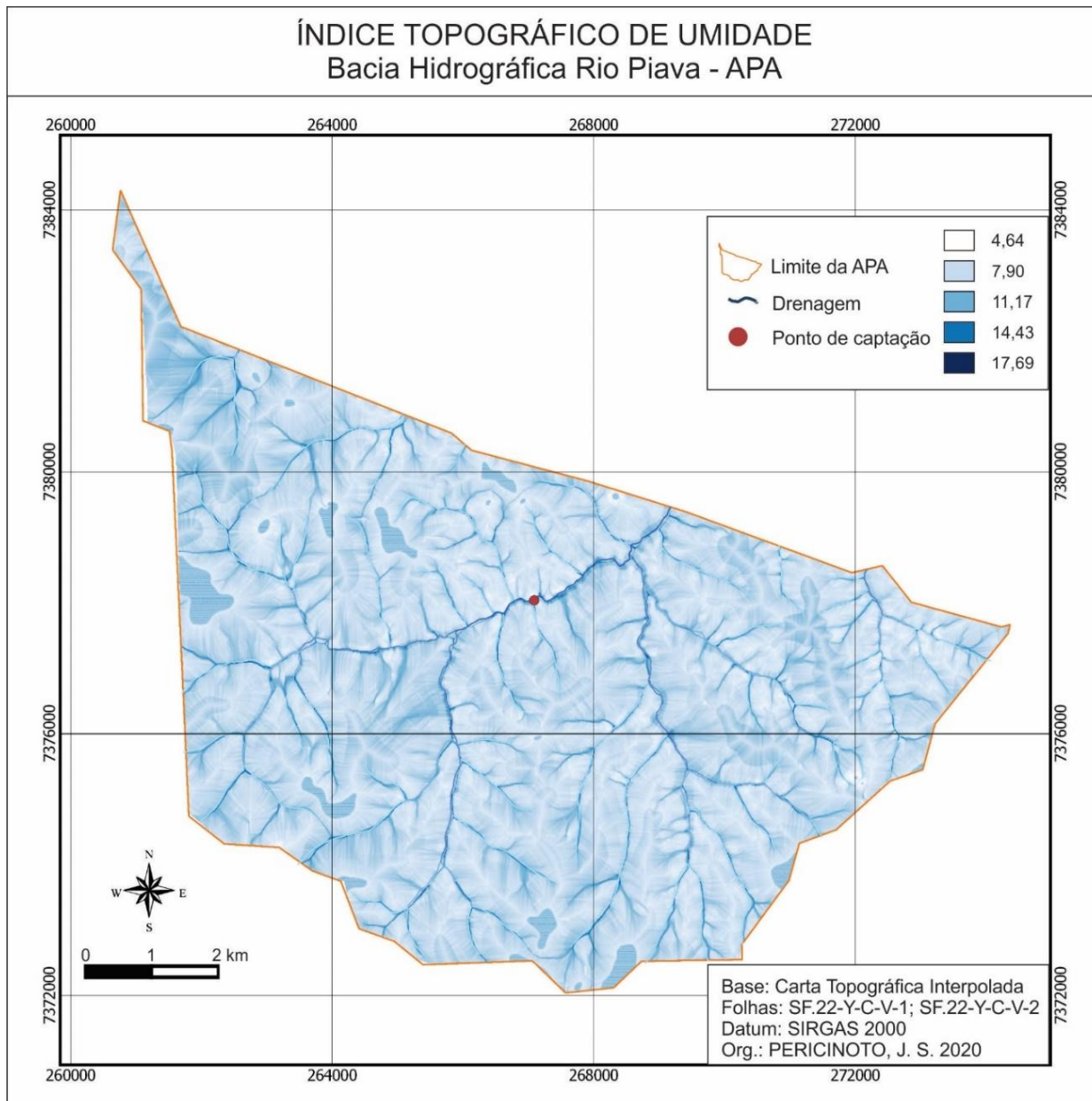
A validação em campo foi realizada a partir da seleção de pontos representativos indicados pelos índices morfométricos. Os pontos foram escolhidos considerando quatro critérios: presença de valores elevados de ITU e/ou IMF, proximidade com canais de primeira ordem, diversidade de usos da terra e facilidade de acesso. Segundo Bortolin, Mendes e Caneppele (2021), a validação empírica é uma etapa fundamental para reduzir incertezas em diagnósticos produzidos por geoprocessamento. Durante as visitas, foram observados aspectos como forma da vertente, presença de concavidades, umidade superficial, vegetação indicadora de ambientes úmidos, sinais de fluxo concentrado, sulcos erosivos, deposição de sedimentos, compactação do solo, presença de gado e interferência de estradas rurais (Bortolin; Mendes; Caneppele, 2021).

5 Resultados e discussões

A análise morfométrica da APA do Rio Piava demonstrou que a vulnerabilidade hidrológica da bacia não está condicionada apenas à declividade, mas à combinação entre forma das vertentes, área de contribuição, tipo de solo, cobertura vegetal e uso da terra. Embora predomine relevo suave-ondulado, foram identificados setores específicos com maior concentração de fluxo, especialmente em cabeceiras côncavas, fundos de vale e transições entre média e baixa vertente. As áreas de convergência topográfica podem apresentar elevada importância hidrológica mesmo quando inseridas em terrenos de baixa declividade. Esses resultados indicam que áreas aparentemente pouco inclinadas podem apresentar elevada sensibilidade ambiental quando associadas à convergência hídrica e a solos arenosos de baixa coesão (Schlesner, 2022; Pericinoto, 2021).

O ITU permitiu a localização de áreas mais suscetíveis à saturação hídrica, em fundos de vale, cabeceiras côncavas e trechos conectados à rede de drenagem, como mostra a figura 4.

Figura 4 – Índice Topográfico de umidade – ITU

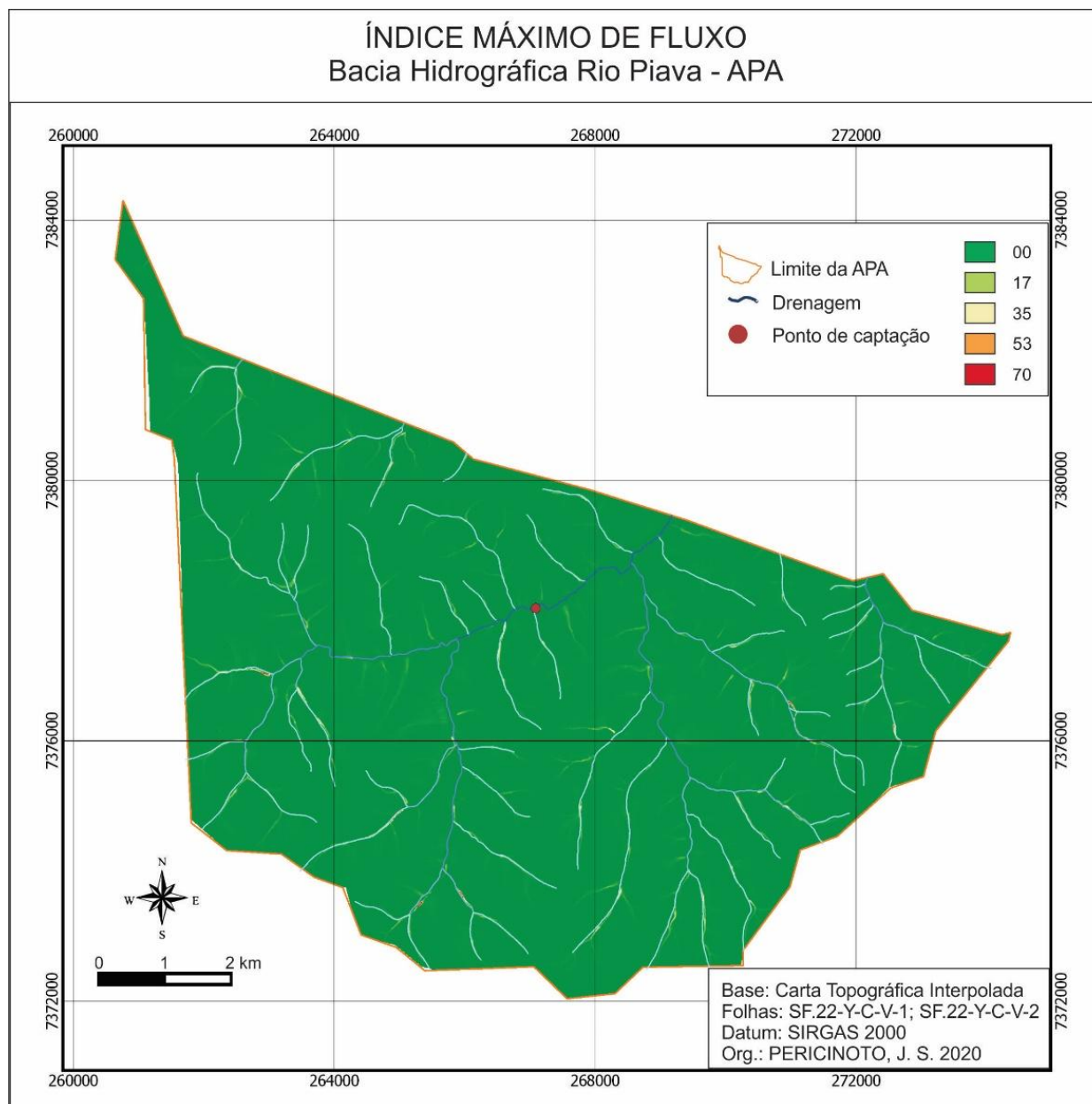


Fonte: Pericinoto, 2021

A ocorrência de altos valores de ITU nesses setores indica a presença de áreas hidrológicamente ativas, que podem atuar como zonas de armazenamento temporário, exfiltração ou escoamento subsuperficial. De acordo com Silva et al. (2024), cabeceiras e canais efêmeros podem ser ativados rapidamente durante eventos de precipitação, ampliando a rede funcional de drenagem. Esse resultado é relevante porque evidencia que a rede de drenagem funcional da bacia se expande em períodos úmidos, ultrapassando os limites representados pela cartografia oficial.

O IMF destacou os setores mais propensos à erosão e transporte de sedimentos, principalmente em áreas de convergência do fluxo e entre vertentes e fundos de vale, como mostra a figura 5.

Figura 5 – Índice Máximo de Fluxo



Fonte: Pericinato, 2021

Os maiores valores do IMF ocorreram em pontos de convergência de fluxo e em áreas de transição entre vertentes e fundos de vale, onde a água acumulada nas porções superiores da bacia tende a se concentrar. Segundo Almeida, Panachuki e Oliveira (2018), o transporte de sedimentos em bacias brasileiras está associado à interação entre energia do escoamento, erodibilidade dos solos e formas de uso da terra. Embora esses setores ocupem áreas relativamente pequenas, sua importância ambiental é elevada, pois podem funcionar como focos de produção de sedimentos e iniciar processos de incisão que posteriormente se conectam aos canais principais (Almeida; Panachuki; Oliveira, 2018).



A integração entre ITU e IMF permitiu identificar áreas prioritárias de ocorrência potencial de canais de ordem zero. Os locais em que altos valores de umidade topográfica coincidiram com maior energia de fluxo foram interpretados como setores críticos, pois reúnem condições favoráveis tanto à saturação do solo quanto à formação de escoamento concentrado. Conforme Almeida e Correa (2020), a conectividade de sedimentos é intensificada quando áreas fontes de sedimentos estão ligadas funcionalmente aos canais por rotas preferenciais de escoamento. Essa combinação indica maior probabilidade de surgimento de canais efêmeros, sulcos incipientes e áreas úmidas temporárias conectadas aos canais de primeira ordem (Almeida; Correa, 2020).

A comparação entre os produtos gerados por geoprocessamento e as cartas topográficas oficiais na escala 1:50.000 revelou limitações importantes da cartografia convencional. Diversas áreas indicadas pelos índices como hidrologicamente sensíveis não estavam representadas como drenagens nos mapas oficiais. Por outro lado, algumas feições cartografadas não apresentaram, em campo, características compatíveis com canais permanentes. Segundo Bortolin, Mendes e Caneppele (2021), a integração entre bases cartográficas, sensoriamento remoto e trabalho de campo é fundamental para refinar diagnósticos ambientais. Essa divergência reforça que mapas em escala média podem generalizar ou omitir feições efêmeras, especialmente em cabeceiras, onde a dinâmica hídrica varia conforme a sazonalidade e os eventos de precipitação (Bortolin; Mendes; Caneppele, 2021).

As observações de campo confirmaram parte significativa das interpretações obtidas por modelagem. Em setores de alto ITU foram observadas concavidades, maior umidade superficial, vegetação associada a ambientes úmidos e indícios de fluxo temporário. Em áreas com valores elevados de IMF, foram identificados sinais de escoamento concentrado, exposição do solo, pequenos sulcos, deposição de sedimentos e influência de estradas rurais. De acordo com Ribeiro et al. (2021), a validação de campo permite verificar se os padrões modelados correspondem a processos efetivamente observáveis na paisagem. Esses elementos indicam que os índices morfométricos não apenas representam padrões topográficos, mas também expressam processos hidrológicos e geomorfológicos observáveis (Ribeiro et al., 2021).

O uso da terra apresentou forte relação com a vulnerabilidade dos canais de ordem zero. A predominância de pastagens sobre áreas de cabeceira e zonas de convergência contribui para a compactação do solo, redução da infiltração e aumento do escoamento superficial. As mudanças no uso e cobertura da terra podem provocar aumentos expressivos nas taxas de erosão, principalmente quando substituem coberturas naturais por usos agropecuários. O pisoteio animal e a baixa cobertura vegetal favorecem a concentração do fluxo, ampliando o potencial de erosão em áreas já naturalmente frágeis (Sampaio; Passos; Alves, 2024; Pericinoto, 2021).

A discussão dos resultados permite afirmar que os canais de ordem zero devem ser



compreendidos como componentes estratégicos da rede hidrográfica, mesmo quando não apresentam fluxo permanente. Sua função está relacionada à regulação da umidade, à conexão entre encostas e canais, à produção de sedimentos e à resposta hidrológica da bacia durante eventos chuvosos. Segundo Souza e Castelo Branco (2020), a análise da conectividade geomorfológica permite compreender como diferentes compartimentos da paisagem contribuem para a dinâmica sedimentar. Em mananciais de abastecimento, como o Rio Piava, a degradação dessas áreas pode ampliar a turbidez da água, aumentar o assoreamento e elevar os custos de tratamento.

Esses resultados dialogam com estudos recentes que destacam a necessidade de integrar cabeceiras, áreas úmidas temporárias e drenagens efêmeras ao planejamento ambiental. A gestão baseada apenas na rede hidrográfica permanente tende a subestimar áreas críticas de geração de escoamento e sedimentos. As mudanças no uso da terra em bacias brasileiras podem alterar simultaneamente processos hidrológicos e sedimentológicos, exigindo medidas preventivas de manejo. Portanto, os mapas de ITU e IMF podem ser utilizados como instrumentos complementares para definir áreas prioritárias de restauração, adequar estradas rurais, orientar práticas conservacionistas e revisar faixas de proteção em unidades de conservação de uso sustentável (Bento; Ribeiro; Kopp, 2025).

6 Conclusão

O estudo demonstrou que a aplicação de geotecnologias e índices morfométricos é adequada para identificar áreas hidrológicamente sensíveis na APA da Bacia Hidrográfica do Rio Piava, especialmente aquelas relacionadas à ocorrência potencial de canais de ordem zero. O Índice Topográfico de Umidade foi eficiente para indicar setores com maior tendência à saturação, enquanto o Índice de Máximo Fluxo permitiu reconhecer áreas com maior energia de escoamento e potencial erosivo. Segundo Schlesner (2022), índices topográficos constituem ferramentas relevantes para interpretar a organização espacial da umidade e da conectividade em cabeceiras. A integração desses índices forneceu uma leitura mais completa da dinâmica de cabeceiras, possibilitando identificar áreas críticas não representadas pela cartografia oficial.

Os resultados confirmam que os canais de ordem zero exercem papel relevante na conectividade hidrológica e de sedimentos da bacia. Mesmo quando apresentam fluxo apenas temporário, essas feições atuam como zonas iniciais de concentração hídrica e podem conectar vertentes aos canais de primeira ordem durante eventos de chuva. Os canais efêmeros são componentes importantes da rede funcional de drenagem, sobretudo em cenários de alteração do uso da terra e intensificação de eventos extremos. Em razão disso, sua desconsideração no planejamento ambiental pode contribuir para o aumento da erosão, do transporte de sedimentos,



do assoreamento e da turbidez da água captada para abastecimento público (Silva et al., 2024)

A predominância de pastagens em áreas de cabeceira e zonas de convergência de fluxo agrava a vulnerabilidade ambiental da APA, especialmente em função da compactação do solo, redução da infiltração e intensificação do escoamento superficial. Essa condição é potencializada pela presença de solos arenosos e materiais friáveis associados à Formação Caiuá, o que torna a bacia particularmente sensível a processos erosivos. Segundo Almeida, Panachuki e Oliveira (2018), a combinação entre solos suscetíveis, uso agropecuário e ausência de práticas conservacionistas amplia a produção de sedimentos em bacias hidrográficas. Portanto, o manejo dessas áreas deve ser tratado como prioridade para reduzir impactos sobre o manancial (Almeida; Panachuki; Oliveira, 2018).

A proteção dos canais de ordem zero deve ser incorporada às estratégias de gestão ambiental da APA do Rio Piava. Recomenda-se que o planejamento da unidade considere não apenas os cursos d'água permanentes e nascentes pontuais, mas também áreas úmidas temporárias, concavidades de cabeceira e setores de alta conectividade hidrológica identificados por modelagem morfométrica. A identificação de áreas ambientalmente frágeis contribui para reduzir conflitos de uso e orientar políticas de conservação. Essa incorporação pode contribuir para a revisão das faixas de proteção, priorização de áreas de restauração, adequação de estradas rurais, controle do escoamento concentrado e redução do aporte de sedimentos ao manancial (Costa; Dupas; Pons, 2020).

Por fim, recomenda-se que estudos futuros utilizem bases altimétricas de maior resolução, imagens obtidas por drones, levantamento de campo em diferentes períodos sazonais e monitoramento da umidade do solo. A combinação entre dados geoespaciais, modelagem hidrológica e validação empírica tende a aprimorar diagnósticos ambientais e aumentar sua aplicabilidade na gestão de bacias. Essas informações poderão aperfeiçoar a delimitação dos canais de ordem zero e fortalecer a formulação de políticas públicas voltadas à segurança hídrica de Umuarama (Pericinoto, 2021).

Nossos agradecimentos à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro e incentivo à pesquisa, essencial para o desenvolvimento deste trabalho, e também ao Programa de Pós-Graduação em Geografia (PGE) da Universidade Estadual de Maringá (UEM), pelo suporte acadêmico e pelas contribuições significativas que enriqueceram a realização deste estudo.



7 Referências

ALMEIDA, L. O.; CORREA, A. C. B. Conectividade Hidrosede sedimentos em Bacias Hidrográficas: conceitos, métodos e aplicações. **Sociedade & Natureza**, v. 32, p. 759-775, 2020.

ALMEIDA, W. S.; PANACHUKI, E.; OLIVEIRA, P. T. S. et al. Effect of soil tillage and vegetal cover on soil water infiltration. **Soil and Tillage Research**, v. 175, p. 130-138, 2018.

BENTO, L. L.; RIBEIRO, H. J.; KOPP, K. A. Análise de uso e cobertura da terra e índices de diferença normalizada de vegetação e água em terras indígenas e entorno na região hidrográfica da Amazônia. **Sociedade & Natureza**, Uberlândia, v. 37, e74902, 2025.

BEVEN, K. J.; KIRKBY, M. J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. **Hydrological Sciences Bulletin**, v. 24, n. 1, p. 43-69, 1979.

BORTOLIN, T. A.; MENDES, L. A.; CANEPPELE, J. C. G. Aplicação de geotecnologias na gestão de bacias hidrográficas: avanços e desafios recentes. **Revista Brasileira de Geografia Física**, 2021.

BRACKEN, L. J.; CROKE, J. The concept of hydrological connectivity and its contribution to understanding runoff-dominated geomorphic systems. **Hydrological Processes**, v. 21, p. 1749-1763, 2007.

BRASIL. Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. **Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa**. Brasília, DF, 2012.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1980.

COSTA, C. W.; DUPAS, F. A.; PONS, N. A. D. Environmental fragility and land use conflicts in watershed management. **Environmental Earth Sciences**, 2020.

PERICINOTO, J. S. **Utilização de geotecnologias para caracterização dos canais de ordem zero da APA da Bacia Hidrográfica Rio Piava – Umuarama, PR**. 2021. 77 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2021.

RIBEIRO, M. E.; BORTOLIN, T. A.; MENDES, L. A.; SANTA RITA, L. C. S. Análise de Séries Hidrológicas na Bacia Hidrográfica afluente à Usina Hidrelétrica Castro Alves, RS. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 4, p. 2042-2058, 2021.

SAMPAIO, P. V.; PASSOS, M. M. dos; ALVES, E. A. C. Consequências da intensificação dos usos da terra nos processos erosivos lineares no sudeste gaúcho. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 25, n. 97, p. 65-88, fev. 2024.

SANTOS, H. G. dos et al. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

SCHLESNER, A. A. **Funções das áreas hidrologicamente frágeis na formação e modelagem do escoamento superficial na bacia experimental do Arroio Lajeado Ferreira, Arvorezinha-RS**. 2022. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) — Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2022.



SILVA, L. F. et al. Análise da interferência da abertura de estradas nos processos hidrossedimentológicos e conectividade hidrogeomorfológica. **Cadernos de Educação, Saúde e Fisioterapia**, v. 11, n. 2, 2024.

SILVA, R. V. da; KOBİYAMA, M. Delineamento automático da rede de drenagem em bacias hidrográficas com ênfase em trechos de zero ordem. In: **CONGRESSO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA**, 21., 2004. Anais [...]. São Paulo: ABRH, 2004.

SOUZA, J. O. P.; CASTELO BRANCO, A. O. T. Impedimentos de transmissão no sistema fluvial e a conectividade da paisagem. **Revista da ANPEGE**, Dourados, v. 16, n. 31, 2020.

STRAHLER, A. N. Hypsometric analysis of erosional topography. **Geological Society of America Bulletin**, v. 63, p. 1117-1142, 1952.

STRAHLER, A. N. Quantitative analysis of watershed geomorphology. **Transactions, American Geophysical Union**, v. 38, n. 6, p. 913-920, 1957.

TUNDISI, J. G.; TUNDISI, T. M. **Limnologia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.