


MODELAGEM DA FRAGILIDADE AMBIENTAL EMERGENTE COMO SUBSÍDIO AO MANEJO E CONSERVAÇÃO DE SOLOS NA BACIA DO RIO PARDO–SP


EMERGING ENVIRONMENTAL FRAGILITY MODELING AS A SUBSIDY FOR
SOIL MANAGEMENT AND CONSERVATION IN THE RIO PARDO BASIN–SP

MODELADO DE LA FRAGILIDAD AMBIENTAL EMERGENTE
COMO APOYO AL MANEJO Y CONSERVACIÓN DE SUELOS
EN LA CUENCA DEL RÍO PARDO-SP

Matheus Vargas de Oliveira¹

 0009-0003-4135-4606
matheus.vargas@unesp.br

Edson Luís Pirolí²

 0000-0002-3350-2651
edson.piroli@unesp.br

Ano XXX - Vol. XXX - (1): Janeiro/Dezembro - 2026

CIÊNCIA
Geográfica
www.agbauru.org.br

ISSN Online: 2675-5122 • ISSN-L: 1413-7461

1 Geógrafo. Mestre em Ciências. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4135-4606>. E-mail: matheus.vargas@unesp.br.

2 Livre Docente em Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento. Professor da UNESP. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3350-2651>. E-mail: edson.piroli@unesp.br.

Agradecimentos: À Universidade Estadual Paulista (UNESP) e ao Programa de Pós-Graduação em Geografia pelo suporte institucional e acadêmico que viabilizou a dissertação de mestrado que deu origem a este artigo.

Artigo recebido em abril de 2026 e aceito para publicação em junho de 2026.

RESUMO: O presente estudo objetivou a análise da fragilidade ambiental emergente da Bacia Hidrográfica do Rio Pardo, para identificar áreas suscetíveis à degradação e subsidiar o planejamento territorial. Empregou-se uma abordagem integrada com geotecnologias e Análise Multicritério (AMC), utilizando o método do Processo Hierárquico Analítico (AHP) para ponderar os fatores declividade, precipitação, geologia, solos e uso da terra. A integração ocorreu via Combinação Linear Ponderada (CLP) em ambiente SIG. Os resultados indicaram que a maior parte da bacia apresenta fragilidade baixa (40,58%) e média (35,92%). A classe de fragilidade muito baixa abrange 12,35% da área. Já as áreas de alta fragilidade correspondem a 10,99% do território, e a classe muito alta representa apenas 0,16%, estando ambas associadas a setores de maior declividade e à intensificação do uso da terra com atividades agropecuárias, especialmente nas zonas de cabeceiras e de recarga hídrica. Conclui-se que a modelagem é uma ferramenta estratégica para a tomada de decisão, fornecendo subsídios técnicos para orientar políticas de conservação do solo e mitigação dos riscos de estresse hídrico.

Palavras-chave: Fragilidade ambiental. Análise Multicritério. AHP. Recursos hídricos.

ABSTRACT: This study aimed to analyze the emergent environmental fragility of the Rio Pardo Watershed to identify areas susceptible to degradation and support territorial planning. An integrated approach using geotechnologies and Multicriteria Analysis (MCA) was employed, using the Analytic Hierarchy Process (AHP) method to weight the factors of slope, precipitation, geology, soils, and land use. The integration occurred via Weighted Linear Combination (WLC) in a GIS environment. The results indicated that the majority of the watershed presents low (40.58%) and medium (35.92%) fragility. The very low fragility class covers 12.35% of the area. Conversely, the high fragility areas correspond to 10.99% of the territory, and the very high class represents only 0.16%; both are associated with sectors of steeper slopes and agricultural land use intensification, especially in headwater and groundwater recharge zones. It is concluded that modeling is a strategic tool for decision-making, providing technical support to guide soil conservation policies and mitigate water stress risks.

Keywords: Environmental fragility. Multicriteria Analysis. AHP. Water resources.

RESUMEN: El presente estudio tuvo como objetivo el análisis de la fragilidad ambiental emergente de la Cuenca Hidrográfica del Río Pardo, para identificar áreas susceptibles a la degradación y subsidiar la planificación territorial. Se empleó un enfoque integrado con geotecnologías y Análisis Multicriterio (AMC), utilizando el método del Proceso Analítico Jerárquico (AHP) para ponderar los factores de pendiente, precipitación, geología, suelos y uso de la tierra. La integración se realizó mediante Combinación Lineal Ponderada (CLP) en un entorno SIG. Los resultados indicaron que la mayor parte de la cuenca presenta fragilidad baja (40,58%) y media (35,92%). La clase de fragilidad muy baja abarca el 12,35% del área. Por otro lado, las áreas de alta fragilidad corresponden al 10,99% del territorio, y la clase muy alta representa apenas el 0,16%, estando ambas asociadas a sectores de mayor pendiente y a la intensificación del uso de la tierra con actividades agropecuarias, especialmente en las zonas de cabeceras y de recarga hídrica. Se concluye que el modelado es una herramienta estratégica para la toma de decisiones, proporcionando subsidios técnicos para orientar políticas de conservación del suelo y mitigación de los riesgos de estrés hídrico.

Palabras clave: Fragilidad ambiental. Análisis Multicriterio. AHP. Recursos hídricos.

INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a intensificação das atividades humanas tem ampliado os conflitos entre a manutenção dos processos naturais e a crescente demanda por recursos. A combinação entre a urbanização acelerada, o aumento populacional e a expansão agroindustrial exercem pressões severas sobre os sistemas ambientais (Traficante *et al.*, 2017). Modelos de ocupação desordenados e desconectados da aptidão do solo aceleram processos degradacionais, com destaque para a erosão e o consequente comprometimento quali-quantitativo dos recursos hídricos. No contexto brasileiro, essas ameaças à segurança hídrica são agravadas por vulnerabilidades na governança ambiental e pela insuficiência de ações integradas de manejo sustentável da terra (De Lima, 2016).

Um reflexo direto dessa vulnerabilidade é observado na Bacia Hidrográfica do Rio Pardo (BHRP). A unidade apresenta importância estratégica no contexto regional devido à presença de polos agroindustriais, ao desenvolvimento urbano crescente e à dependência da água superficial para o abastecimento público de cidades importantes e de população superior a 300 mil pessoas. Entretanto, nas últimas décadas, a BHRP tem evidenciado importantes sinais de estresse hídrico. Como exemplo, cita-se o episódio crítico registrado em novembro de 2021, quando o leito do Rio Pardo apresentou mínima histórica na região de Ourinhos, o que comprometeu o abastecimento de cerca de 100 mil habitantes e configurou o maior colapso hídrico documentado em sua história (Piroli, 2022).

Para prever e mitigar cenários críticos como esse, o planejamento ambiental exige abordagens sistêmicas que considerem simultaneamente a dinâmica biofísica e as formas de apropriação do espaço. Nesse contexto, a bacia hidrográfica consolida-se como a unidade territorial e de gestão ideal (Donadio; Galbiatti; Paula, 2005). Mais do que uma mera área de captação natural (Tucci; Bertoni, 2003), a bacia atua como um ente sistêmico complexo, onde ocorrem os balanços de entrada e saída de água, sedimentos e energia (Porto; Porto, 2008). Por integrar tais fluxos, essa unidade espacial explicita as relações de causa e efeito entre a suscetibilidade do meio físico e os impactos da ação antrópica (Piroli, 2002), sendo a referência fundamental para conter o avanço da degradação dos solos e proteger os mananciais.

A integração de dados geospaciais em Sistemas de Informação Geográfica (SIG) permite a construção de camadas analíticas que representam os condicionantes naturais e antrópicos das bacias hidrográficas, aprimorando a disponibilidade de informações aos gestores (Morales; Valente, 2025). O avanço dessas tecnologias impulsionou o uso da Análise Multicritério (AMC) na avaliação da fragilidade ambiental, visto que o diagnóstico resulta do efeito combinado de múltiplos fatores. Nesse contexto, a associação entre SIG e AMC configura-se como uma ferramenta essencial para a tomada de decisões em cenários de conflito entre a conservação e o uso econômico da terra, permitindo a ponderação simultânea de critérios segundo sua importância relativa (França *et al.*, 2022).

Entre as abordagens multicritério, destaca-se o Processo Hierárquico Analítico (AHP), amplamente adotado em estudos ambientais por sua flexibilidade e confiabilidade científica (Saaty, 1980). O método estrutura problemas complexos em níveis hierárquicos e transforma avaliações empíricas em valores numéricos ponderados por meio de matrizes de julgamentos pareados (Das Uttam; Behera, 2024). Essa sistemática é valiosa para integrar percepções técnicas sobre a fragilidade de fatores biofísicos e antrópicos, como o grau de proteção conferido pela cobertura vegetal (Madal; Prakash; Modal, 2025). Além disso, a validade do modelo é assegurada pela verificação da Razão de Consistência (RC), para evitar vieses interpretativos e garantir o rigor estatístico (Dos Santos; Da Cruz, 2013).

A espacialização dos pesos derivados do AHP é feita via álgebra de mapas, com destaque para a técnica de Combinação Linear Ponderada (CLP). A CLP possibilita a integração de múltiplos fatores em um índice sintético através da soma ponderada, permitindo uma leitura sistêmica e aplicada da suscetibilidade do território (Malczewski, 2004). Dessa forma, a convergência entre AMC e SIG promove avanços na análise da fragilidade ambiental, consolidando instrumentos de inteligência territorial capazes de subsidiar políticas públicas voltadas à proteção de áreas críticas, à prevenção de riscos e ao manejo sustentável dos recursos naturais (Pautz *et al.*, 2023).

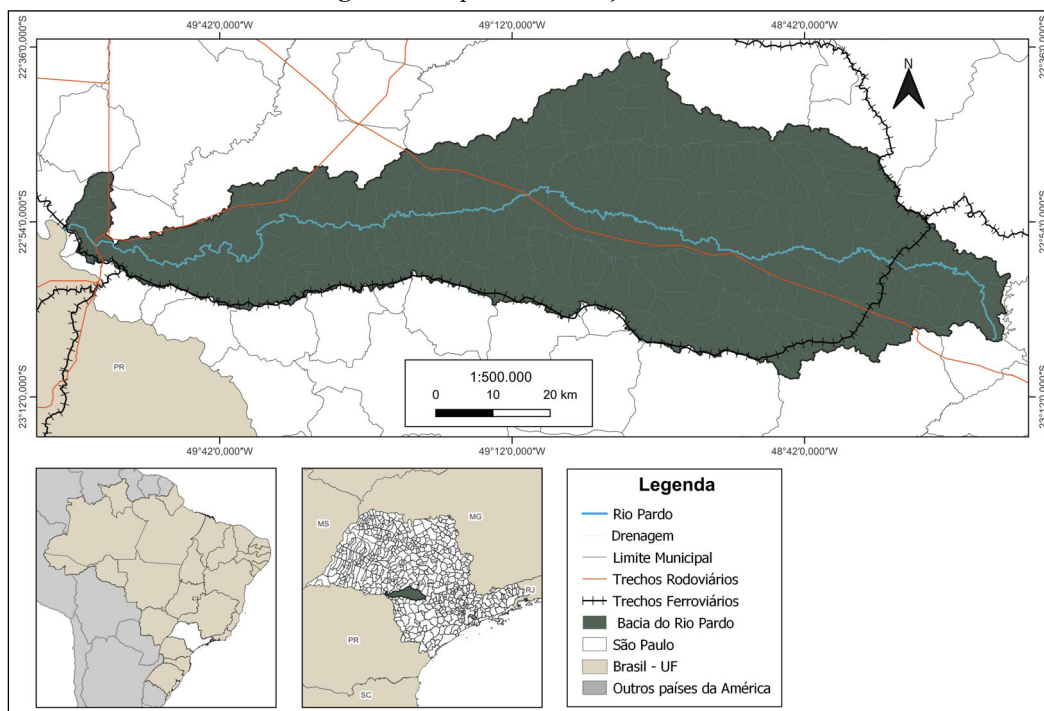
Diante deste cenário, o presente estudo teve como objetivo analisar a fragilidade ambiental da BHRP utilizando geotecnologias e análise multicritério, visando fornecer subsídios técnicos para o planejamento territorial e a segurança hídrica regional. Para tanto, buscou-se organizar um banco de dados geoespacial integrando as variáveis ambientais e antrópicas da bacia, mapear os graus de fragilidade emergente e examinar a influência das práticas de ocupação na intensificação de processos degradacionais e seus impactos nos recursos hídricos.

MATERIAL E MÉTODOS

Caracterização da área de estudo

A BHRP situa-se na porção centro-sudoeste do estado de São Paulo, abrangendo uma área total de 4.808,99 km² (Piroli, 2022). O rio principal possui extensão aproximada de 264,25 km, apresentando um gradiente altimétrico que varia de 993,56 m na região de cabeceiras (no município de Pardinho) a 341,27 m em sua foz (no município de Salto Grande), fator que condiciona a energia fluvial e a suscetibilidade a processos erosivos. A unidade compreende 20 municípios paulistas, que integram a Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos, UGRHI-17 - Médio Paranapanema (Figura 1).

Figura 1. Mapa de localização da BHRP



Fonte: Elaborado por Matheus Vargas de Oliveira (2025).

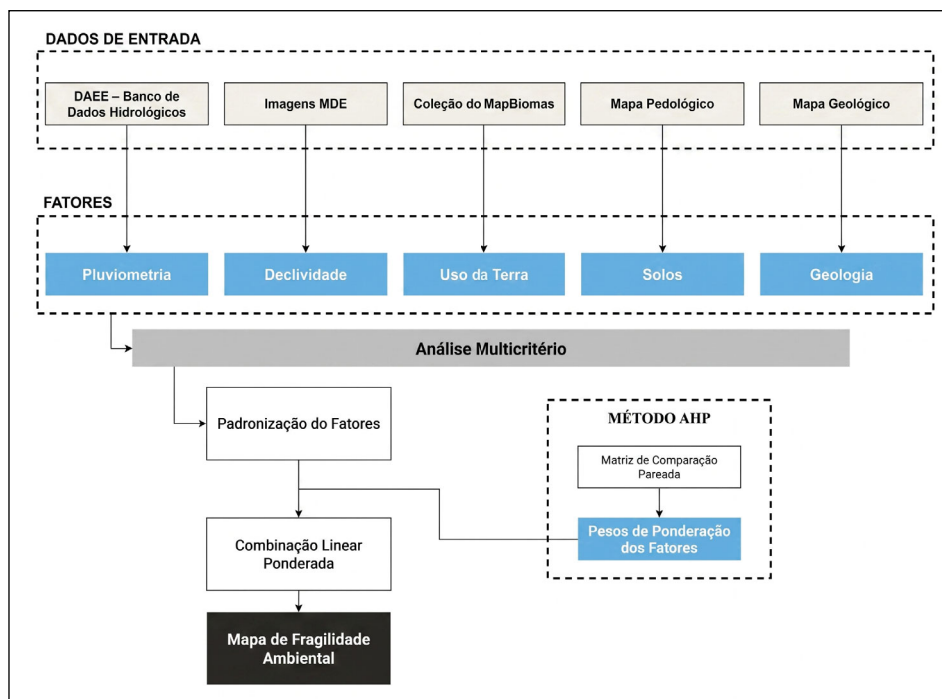
Geomorfologicamente, conforme Ross e Moroz (1996), a área está inserida na Unidade Morfoestrutural da Bacia Sedimentar do Paraná, englobando o Planalto Centro-Occidental e o Planalto Residual de Botucatu. Essa base física, associada a uma dupla estacionalidade climática (caracterizada por verões chuvosos e invernos secos) condiciona a predominância da Floresta Estacional Semidecidual e de encaves de Cerrado, identificados sobretudo na região central da unidade (Kronka, 2005).

Elaboração da base de dados

A base de dados geoespaciais foi estruturada a partir de fontes oficiais para assegurar a consistência cartográfica. Os limites hidrográficos foram obtidos junto à ANA (2019, 2020), enquanto a malha político-administrativa dos municípios da bacia seguiu a base do IBGE (2024). Para o meio físico, utilizou-se o Modelo Digital de Elevação ALOS World 3D (30m) da JAXA (2014), séries históricas de precipitação (2000-2022) do DAEE, o Mapa Pedológico (Rossi, 2017) e o Mapa Geológico (Perrotta *et al.*, 2006) do Estado de São Paulo. Os dados de uso e cobertura da terra foram extraídos da Coleção 9.0 do MapBiomas (2023).

O processamento cartográfico, envolvendo georreferenciamento, reclassificação temática e álgebra de mapas, foi conduzido no software QGIS (versão 3.28.11). Adotou-se o sistema de referência SIRGAS 2000/UTM zone 22S (EPSG: 31962). Os cálculos estatísticos e a estruturação da matriz de comparação pareada do método AHP foram operacionalizados em planilhas eletrônicas, conforme o fluxo metodológico sintetizado na Figura 2.

Figura 2. Fluxograma metodológico utilizado para a modelagem da fragilidade ambiental emergente



Fonte: Elaborado por Matheus Vargas de Oliveira (2025).

Metodologia de análise

A modelagem da fragilidade ambiental fundamentou-se na metodologia proposta por Ross (1994, 2012), que avalia o equilíbrio dinâmico das paisagens a partir da interação entre os fluxos de energia da Terra. A análise integrou variáveis físicas (declividade, solos e geologia), biótico-antrópicas (uso e cobertura da terra) e climáticas (pluviometria), consideradas determinantes para a compreensão das dinâmicas de degradação e conservação da BHRP.

Para a espacialização dos fatores, a pluviometria foi desenvolvida por meio da interpolação dos dados das estações meteorológicas utilizando o método *Inverse Distance Weighting* (IDW), resultando na geração das isoietas de precipitação média anual. A declividade, por sua vez, foi derivada do Modelo Digital de Elevação (ALOS World 3D). Os valores altimétricos foram processados para gerar um raster de inclinação expresso em porcentagem, o qual foi reclassificado segundo as classes de relevo propostas pela Embrapa.

O fator uso e cobertura da terra originou-se dos dados matriciais do MapBiomas (Coleção 9.0). As imagens foram convertidas do formato raster para o vetorial, viabilizando a vetorização, a reclassificação das tipologias de ocupação e a atribuição de seus respectivos graus de proteção ao solo. Por fim, os dados de pedologia e geologia foram recortados e adaptados a partir dos mapas estaduais, isolando as classes e formações ocorrentes na bacia.

Concluída a etapa de pré-processamento, os PIs (Planos de Informação) foram submetidos à normalização temática. Cada fator foi discretizado em cinco níveis de fragilidade, com notas variando de 1 (Muito Baixa) a 5 (Muito Alta) (Tabela 1). Essa escala ordinal permitiu converter grandezas distintas, como a declividade (%) e a pluviometria (mm), em uma métrica comum para a análise multicritério.

Tabela 1. Notas e classes de fragilidade

Nota	Classe de Fragilidade
1	Muito baixo
2	Baixo
3	Médio
4	Alto
5	Muito Alto

Fonte: Ross (1994, 2012). Adaptado por Matheus Vargas de Oliveira (2026).

Para garantir a compatibilidade espacial necessária à álgebra de mapas, as bases em formato vetorial foram convertidas para o modelo matricial (*rasterização*) com resolução espacial de 30 metros. Simultaneamente, as camadas originalmente em formato raster foram submetidas à reclassificação por tabela, assegurando a uniformidade entre os fatores.

Para a atribuição dos pesos relativos aos condicionantes, aplicou-se o AHP. A estruturação iniciou-se com a elaboração de uma matriz quadrada de comparação pareada, na qual os cinco critérios foram avaliados dois a dois, sob o princípio da reciprocidade matemática. Os julgamentos fundamentaram-se na escala de Saaty (1980), que varia de 1 (igual importância) a 9 (extrema importância) (Tabela 2). Após a normalização da matriz, calculou-se a média aritmética de cada linha para a obtenção do

autovetor de prioridades, cujos valores normalizados correspondem aos pesos finais de cada fator ambiental utilizados na álgebra de mapas.

Tabela 2. Escala de valores para a comparação pareada

Escala de Importância	Definição na comparação pareada
1	Dois fatores são igualmente importantes para o objetivo.
3	Um fator é moderadamente importante sobre outro para o objetivo.
5	Um fator é fortemente importante sobre outro para o objetivo.
7	Um fator é muito fortemente importante sobre outro para o objetivo.
9	Um fator é extremamente importante sobre outro para o objetivo.
2, 4, 6, 8	Valores intermediários.

Fonte: Saaty (1980).

Considerando que a ponderação envolve julgamentos comparativos, a validação do modelo exige a verificação da coerência das avaliações (SAATY, 2005). Para isso, determina-se inicialmente o autovalor máximo (λ_{\max}) a partir do produto entre a matriz original e o autovetor. A coerência matemática dos julgamentos é atestada pelo Índice de Consistência (IC), expresso pela Equação 1:

$$IC = \frac{(\lambda_{\max} - n)}{(n - 1)} \quad (1)$$

onde n representa o número de critérios avaliados no modelo. Por fim, a robustez estatística dos pesos é validada pelo cálculo da Razão de Consistência (RC), que relaciona o IC calculado com um Índice Randômico (IR) predefinido, conforme a Equação 2:

$$RC = \frac{IC}{(IR)} \quad (2)$$

O IR corresponde ao valor de consistência esperado para matrizes de mesma ordem geradas aleatoriamente. Para a matriz deste estudo, composta por 5 critérios ($n = 5$), o IR adotado foi de 1,12 (SAATY, 1980). A matriz de pesos e os julgamentos multicritério são considerados logicamente consistentes e aptos para a integração espacial quando a RC atinge um valor inferior ou igual a 0,10.

A integração final dos PIs foi realizada através da CLP, técnica que permite a análise integrada de múltiplos critérios mediante a aplicação dos pesos obtidos no AHP. O procedimento foi executado na ferramenta *Raster Calculator* do QGIS, onde cada plano de informação reclassificado foi multiplicado pelo seu respectivo peso e os resultados foram somados pixel a pixel, seguindo a lógica da Equação 3:

$$Fragilidade = \Sigma (wi * Fi) \quad (3)$$

Onde w_i representa o peso relativo do critério e F_i corresponde às notas de fragilidade atribuídas. O modelo matricial resultante, com 30 metros de resolução, foi posteriormente poligonizado e

submetido à ferramenta *Dissolver* para unificação das classes homólogas, permitindo a mensuração precisa das áreas em km² e porcentagem.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

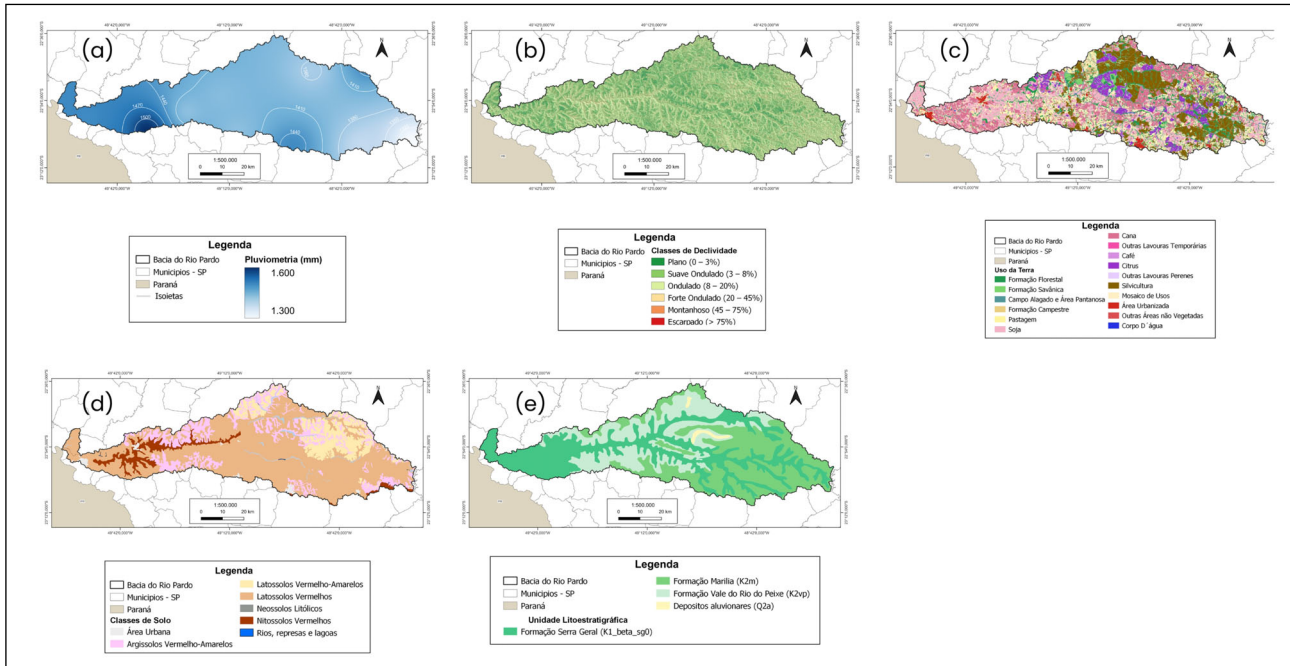
Os fatores de análise

A dinâmica pluviométrica da BHRP (Figura 3a) é marcada por uma precipitação média anual de 1.417,06 mm, apresentando clara estacionalidade com verões chuvosos, com destaque para dezembro e janeiro (que registram 188,29 mm e 267,07 mm, respectivamente), e invernos secos, com mínimas em julho (49,29 mm) e agosto (46,43 mm). A topografia da bacia caracteriza-se por um relevo de baixa a média declividade. Segundo a classificação da Embrapa, o relevo suave-ondulado (3% a 8% de inclinação) ocupa a maior extensão, representando 44,78% da área total, seguido de perto pelo relevo plano (0% a 3%), com 34,98%. As áreas de maior inclinação da superfície, enquadradas nas classes ondulada (8% a 20%) e forte-ondulada (20% a 45%), abrangem 18,48% e 1,66% do território, restringindo-se a setores específicos, sobretudo à montante (Figura 3b).

No que se refere a base litoestratigráfica, a BHRP é sustentada prioritariamente por três unidades geológicas, a Formação Serra Geral, que domina 38,19% do território, seguida pelas Formações Marília (34,53%) e Vale do Rio do Peixe (26,34%). Essa estrutura geológica condiciona diretamente a formação das classes pedológicas predominantes (Figura 3e). O mapa de solos (Figura 3d) revela o amplo domínio dos Latossolos Vermelhos (LV21), que ocupam a maior parcela da bacia com 63,93% de sua extensão. Na sequência, destacam-se os Argissolos Vermelho-Amarelos (16,45%) e os Latossolos Vermelho-Amarelos (11,82%). Em conjunto, essas três classes representam mais de 92% da área total, configurando um substrato caracterizado por solos profundos e altamente intemperizados.

A distribuição do uso e cobertura da terra reflete a forte vocação agrossilvipastoril e a pressão antrópica sobre o território. As atividades agropecuárias, principalmente as agrícolas são as grandes protagonistas da paisagem, lideradas por áreas com cultivo de cana-de-açúcar (17,98%), seguidas pela silvicultura (17,17%), por áreas com mosaicos de usos (17,11%) e por lavouras temporárias de soja (13,46%). O cultivo perene, com destaque para as áreas com citrus, abrange 6,37% da bacia, enquanto as áreas de pastagem correspondem a 5,32%. Em contrapartida, os remanescentes de vegetação natural, representados majoritariamente pela Formação Florestal, cobrem 13,17% da área de estudo, limitando-se frequentemente a fragmentos esparsos ou Áreas de Preservação Permanente (APP) ao longo da rede de drenagem. As áreas urbanizadas, embora com altos impactos locais, ocupam 1,89% do total da bacia (Figura 3c).

Figura 3. Fatores utilizados na determinação da fragilidade ambiental emergente. Pluviosidade (a), Declividade (b), Uso da terra (c), Solos (d) e Geologia (e)



Fonte: Elaborado por Matheus Vargas de Oliveira (2026).

Ponderação Multicritério e Validação

Após a padronização de Roos, a definição da importância relativa dos fatores foi realizada por meio do AHP. A estruturação do método iniciou-se com a construção de uma matriz recíproca de comparação pareada, utilizando a escala fundamental de Saaty (1980), na qual os critérios foram avaliados dois a dois quanto à sua influência sobre a degradação ambiental (Tabela 3).

Tabela 3. Matriz de comparação pareada

Critérios	Pluviometria	Declividade	Uso da terra	Pedologia	Geologia
Pluviometria	1,00	3,00	3,00	5,00	7,00
Declividade	0,33	1,00	1,00	3,00	5,00
Uso da terra	0,33	1,00	1,00	2,00	4,00
Pedologia	0,20	0,33	0,50	1,00	3,00
Geologia	0,14	0,20	0,25	0,33	1,00

Fonte: Elaborado por Matheus Vargas de Oliveira (2026).

A partir desta matriz, procedeu-se à normalização dos dados e à verificação da confiabilidade matemática dos julgamentos. O cálculo do autovalor principal ($\lambda_{máx}$) resultou em 5,10, valor muito próximo ao número de critérios analisados no modelo (n = 5). A aplicação desse resultado gerou uma Razão de Consistência (RC) de 0,023, sendo este índice significativamente inferior ao limite de

tolerância de 0,10 (Saaty, 1980). Assim, confirmou-se a consistência lógica da matriz, atestando a ausência de contradições nos julgamentos realizados.

Com a matriz validada, extraiu-se o vetor de prioridades. O fator pluviosidade assumiu o maior grau de influência (47,05%), resultado esperado por sua atuação direta como agente climático desencadeador dos processos morfodinâmicos. Na sequência, a declividade configurou o segundo fator mais relevante (20,70%), operando como o principal acelerador da energia pluvial. Terrenos mais inclinados reduzem o tempo de infiltração da água e aumentam exponencialmente o transporte de sedimentos, corroborando as evidências destacadas por França (2018) e Matos (2020) sobre a forte correlação do relevo com os processos erosivos e a instabilidade das vertentes. Atuando como modulador dessas forças motoras, o uso da terra (17,94%) define o grau de proteção ou exposição do substrato. Conforme discutido por Traficante (2016), este fator ganha destaque na modelagem ambiental por condicionar as consequências antrópicas na dinâmica erosiva, influenciando diretamente a resposta da paisagem às chuvas e à topografia.

Por fim, a pedologia (9,70%) e a geologia (4,60%) receberam os menores pesos percentuais por comporem a base estrutural predominantemente estática do sistema. Embora o solo seja o elemento físico diretamente erodido, a sua vulnerabilidade intrínseca raramente gera degradação severa de forma isolada. Conforme apontam Bertoni e Lombardi Neto (2012), a erosão acelerada é resultado de uma sinergia de fatores, onde a erodibilidade natural do solo é potencializada pela supressão da cobertura vegetal e pelo manejo inadequado do terreno perante a energia erosiva do clima. Tal comportamento explica o peso atribuído, visto que a suscetibilidade pedológica se manifesta com maior intensidade apenas quando ativada pela ação conjunta dos outros componentes, como precipitações elevadas, declividades significativas e manejos inadequados, que operam como os vetores dinâmicos de sua degradação. A geologia, de modo análogo, exerce uma influência indireta sobre os processos erosivos, cujos efeitos se refletem de maneira secundária na modelagem por meio da estruturação das formas de relevo e da origem dos solos.

Com as ponderações estabelecidas, a integração espacial dos cinco fatores condicionantes foi realizada por meio de álgebra de mapas, conforme estruturado na Equação 4:

$$Fragilidade = (Pl * 0,471) + (De * 0,207) + (Uso * 0,179) + (So * 0,097) + (Ge * 0,046) \quad (4)$$

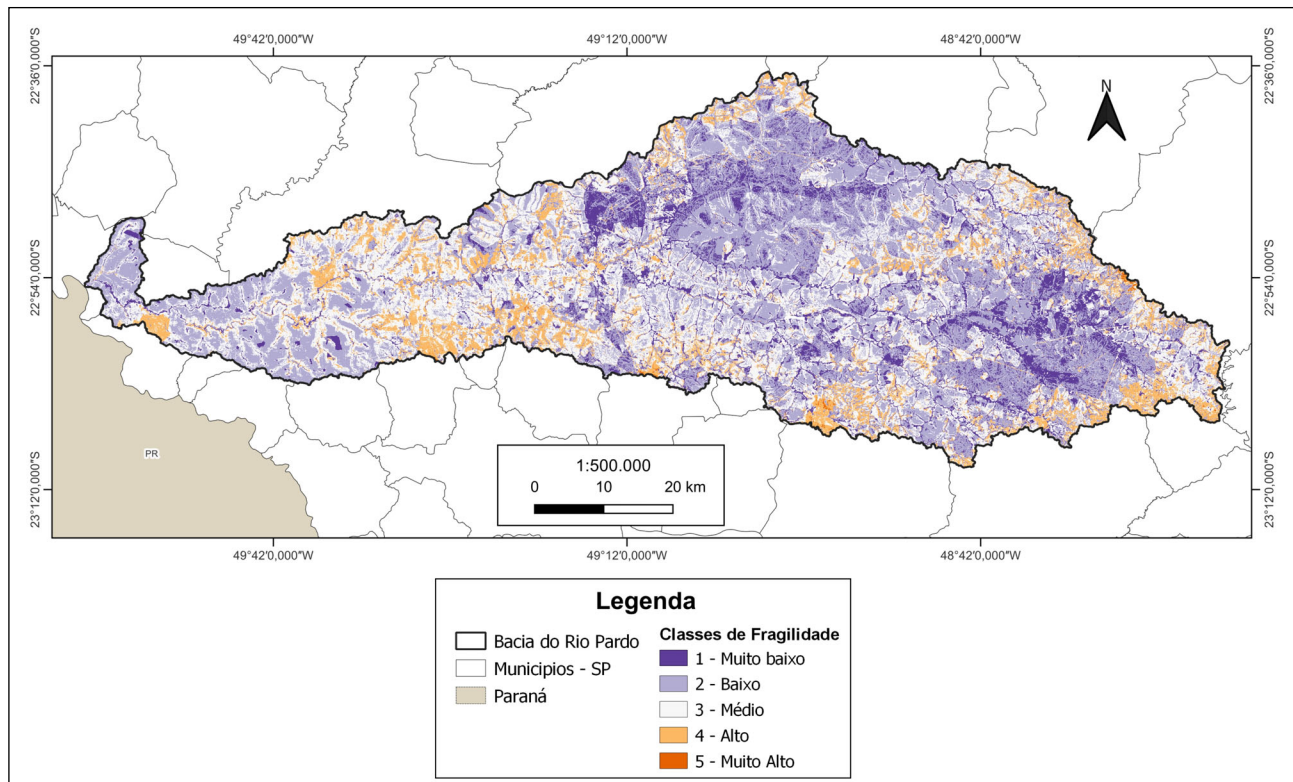
Este cruzamento matricial resultou no modelo de fragilidade ambiental emergente na BHRP, em que *Pl* representa o fator pluviométrico padronizado e *De* corresponde à declividade, *Uso* é o fator de uso e ocupação, *So* é o fator solos e *Ge* e o fator geológico.

Fragilidade Ambiental Emergente

Os cinco fatores condicionantes resultaram no mapa-síntese de fragilidade ambiental emergente (Figura 4), permitindo a quantificação das áreas de suscetibilidade da BHRP. Os resultados evidenciaram que a bacia apresenta uma condição geral de estabilidade relativa, com aproximadamente 76,5% de sua área enquadrada nas classes de fragilidade baixa (40,58%) e média (35,92%). Destaca-se também a classe de fragilidade muito baixa, que abrange 12,35% da bacia, ao passo que a classe muito alta manteve baixíssima representatividade espacial (0,16%). O ponto crítico de atenção para

o planejamento, no entanto, reside nos 10,99% do território classificados com fragilidade alta. Essas áreas críticas não se distribuem de forma homogênea, concentrando-se predominantemente nos setores de maior energia de relevo ou submetidos a usos mais intensivos da terra.

Figura 4. Mapa de fragilidade ambiental emergente da BHRP



Fonte: Elaborado por Matheus Vargas de Oliveira (2025).

Sob a ótica do ordenamento territorial, a maior concentração dessa alta fragilidade localiza-se na porção a montante da bacia (municípios de Pardinho, Botucatu, Pratânia e Itatinga), área estratégica por abrigar as principais zonas de recarga e cabeceiras de drenagem. Nesses setores, a suscetibilidade natural do relevo ondulado a fortemente ondulado e a presença de solos mais vulneráveis à erosão (como os Argissolos e Neossolos Litólicos) entram em conflito direto com a expansão de lavouras como soja e cana-de-açúcar. Conforme destacado por Crepani *et al.* (2001) e França (2018), a remoção da cobertura vegetal primária nestas áreas declivosas quebra a estabilidade das vertentes. Sem a interceptação foliar e a proteção radicular, a energia pluvial traduz-se em escoamento superficial acelerado (Matos, 2020), potencializando o transporte de sedimentos e inviabilizando a recarga profunda dos aquíferos.

Em contrapartida, nas porções centrais e a jusante da bacia, onde as condições topográficas são naturalmente mais amenas, identificou-se a fragilidade correlacionada com as áreas urbanas, especialmente em municípios como Avaré e Ourinhos. Nestes locais, a acelerada impermeabilização do solo, aliada à ocupação de planícies de inundação e à canalização de córregos, altera drasticamente o hidrograma local (TUCCI, 2005). Essa dinâmica comprova que, mesmo sobre um meio físico de baixa fragilidade natural, o uso inadequado eleva o risco ambiental a níveis críticos. O reflexo direto dessa combinação, erosão acelerada a montante e enxurradas urbanas a jusante, é o assoreamento da

calha do Rio Pardo, onde os sedimentos suprimem o volume de armazenamento hídrico, aumentam os custos de tratamento e potencializam episódios de estresse de abastecimento da população.

Diante deste diagnóstico, a mitigação da fragilidade na BHRP exige a adoção de práticas de manejo territorial adaptadas às especificidades de cada setor (Piroli, 2022). Para as áreas a montante, impõe-se a recuperação florestal obrigatória, além das Áreas de Preservação Permanente (APPs), a implementação rigorosa do plantio direto e o terraceamento em nível nas propriedades agrícolas. No ambiente urbano, são emergenciais políticas de infraestrutura verde, como a ampliação de áreas permeáveis e a criação de bacias de retenção pluvial. Tais ações reforçam que a gestão da fragilidade e a garantia da segurança hídrica não podem ser conduzidas de forma fragmentada, demandando uma governança ambiental integrada que transcenda os limites político-administrativos dos municípios da bacia.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A modelagem da fragilidade ambiental emergente da BHRP evidenciou que embora grande parte do território apresente condição de estabilidade relativa, parcelas críticas da paisagem demandam intervenção imediata. O mapeamento revelou que os setores de maior suscetibilidade se concentram predominantemente nas porções a montante, onde a conjugação de relevos mais ondulados com a intensificação das práticas agropecuárias compromete diretamente as zonas de recarga e nascentes.

Simultaneamente, o adensamento urbano demonstrou que a impermeabilização inadequada do solo e a ocupação das margens fluviais em cidades de maior porte, potencializam processos erosivos e o assoreamento dos corpos d'água. Essa dinâmica atesta que a pressão antrópica desordenada atua como um catalisador da degradação, ameaçando a regularização das vazões e a segurança hídrica de toda a bacia.

A integração de SIG com a AMC, por meio do método AHP e da CLP, demonstrou ser uma abordagem metodológica viável para o diagnóstico territorial. A espacialização dessas variáveis fornece um instrumento técnico de inteligência geográfica capaz de subsidiar políticas públicas alinhadas aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS 6 e 11), focadas na gestão integrada de recursos hídricos e na redução de riscos socioambientais.

Conclui-se assim, que a mitigação do estresse hídrico na BHRP depende intrinsecamente da adoção de manejo sistêmico que priorize ações preventivas e conservacionistas nas áreas à montante, associadas ao rigoroso ordenamento da expansão do uso da terra nos setores rurais e urbanizados.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Plano Integrado de Recursos Hídricos da Unidade de Gestão de Recursos Hídricos Paranapanema**. Brasília, DF: ANA, 2015. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/45d66f15-0605-4167-ac08-b24a6cdc2879>. Acesso em: 28 ago. 2025.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 8. ed. São Paulo: Ícone, 2012.

COMITÊ DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DO MÉDIO PARANAPANEMA (CBH-MP). **Plano de bacia da Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Médio Paranapanema (UGRHI-17)**. São Paulo: CBH-MP, 2017.

CREPANI, E. *et al.* **Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao zoneamento**

- ecológico-econômico e ao ordenamento territorial.** São José dos Campos: INPE, 2001.
- DAS, U.; BEHERA, B. Geospatial assessment of ecological vulnerability of fragile Eastern Duars Forest integrating GIS-based AHP, CRITIC and AHP-TOPSIS models. **Geomatics, Natural Hazards and Risk**, v. 15, n. 1, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/19475705.2024.2330529>. Acesso em: 18 nov. 2025.
- DE LIMA, G. A. *et al.* Bacia hidrográfica como unidade de planejamento e gestão: estudo de caso Ribeirão Isidoro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL, 7., 2016, Campina Grande. **Anais [...]**. Campina Grande: IBEAS, 2016.
- DONADIO, N. M. M.; GALBIATTI, J. A.; PAULA, R. C. de. Qualidade da água de nascentes com diferentes usos do solo na bacia hidrográfica do Córrego Rico, São Paulo, Brasil. **Engenharia Agrícola**, v. 25, p. 115-125, 2005.
- DOS SANTOS, L. F.; DA CRUZ, R. B. C. O uso do método AHP na tomada de decisão para seleção de lajes de edifícios comerciais. **Engenharia, Estudo e Pesquisa ABPE**, v. 13, n. 1, p. 39-52, 2013.
- FRANÇA, L. C. J. **Fragilidade Ambiental Potencial da Bacia Hidrográfica do Rio Jequitinhonha, Minas Gerais, Brasil.** 2018. 114 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, 2018.
- FRANÇA, L. C. J. *et al.* Environmental Fragility Zoning Using GIS and AHP Modeling: Perspectives for the Conservation of Natural Ecosystems in Brazil. **Conservation**, v. 2, n. 2, p. 349-366, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/conservation2020024>. Acesso em: 18 nov. 2025.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Malhas territoriais.** Rio de Janeiro: IBGE, 2024. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html>. Acesso em: 24 ago. 2025.
- JAPAN AEROSPACE EXPLORATION AGENCY (JAXA). **ALOS Global Digital Surface Model (DSM) “ALOS World 3D-30m” (AW3D30) Ver.3.2/3.1 Product Description.** [S. l.]: JAXA EORC, 2021.
- KRONKA, F. J. N. *et al.* **Inventário florestal da vegetação natural do Estado de São Paulo.** São Paulo: Secretaria do Meio Ambiente / Instituto Florestal, 2005.
- MALCZEWSKI, J. GIS-based land-use suitability analysis: a critical overview. **Progress in Planning**, v. 62, n. 1, p. 3-65, 2004.
- MANDAL, B.; GOSWAMI, K. P.; MONDAL, S. Modelling environmental fragility in an industrial landscape: An integrated remote sensing–GIS framework for sustainable planning in Brahmani–Dwarka Interfluve. **Geosystems and Geoenvironment**, v. 5, n. 1, p. 100460, 2026. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geogeo.2025.100460>. Acesso em: 18 nov. 2025.
- MATOS, A. C. M. **Identificação da fragilidade ambiental potencial através de análise multicritérios e técnicas de geoprocessamento: município de Patos de Minas/MG.** 2020. 106 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental) - Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, 2020.
- MORALES, M. V.; VALENTE, R. A. Mapping environmental fragility in human-modified landscapes using fuzzy logic and continuous data spatialization. **Journal for Nature Conservation**, v. 86, p. 126932, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2025.126932>. Acesso em: 18 nov. 2025.
- ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Indicadores Brasileiros para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.** Brasília, DF: ONU Brasil, 2022. Disponível em: <https://odsbrasil.gov.br/>. Acesso em: 21 nov. 2023.

- PAUTZ, C. *et al.* Mapping the environmental vulnerability of a lagoon using fuzzy logic and the AHP method. **Water**, v. 15, n. 11, p. 2102, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w15112102>.
- PERROTTA, M. M. *et al.* **Mapa Geológico do Estado de São Paulo, escala 1:750.000**. São Paulo: Programa Geologia do Brasil - PGB; CPRM, 2006.
- PIROLI, E. L. **Geoprocessamento na determinação da capacidade e avaliação do uso da terra do município de Botucatu-SP**. 2002. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2002.
- PIROLI, E. L. **Água e bacias hidrográficas: planejamento, gestão e manejo para enfrentamento das crises hídricas**. São Paulo: Editora Unesp, 2022.
- PORTO, M. F. A.; PORTO, R. L. L. Gestão de bacias hidrográficas. **Estudos Avançados**, v. 22, n. 63, p. 43-60, 2008. Disponível em: <https://revistas.usp.br/eav/article/view/10292>. Acesso em: 27 ago. 2025.
- QGIS DEVELOPMENT TEAM. **QGIS Geographic Information System**. Versão 3.28.11. Open Source Geospatial Foundation Project, 2025. Disponível em: <http://www.qgis.org>. Acesso em: 27 ago. 2025.
- ROSS, J. L. S. Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados. **Revista do Departamento de Geografia**, n. 8, p. 63-74, 1994.
- ROSS, J. L. S. Landforms and environmental planning: potentialities and fragilities. **Revista do Departamento de Geografia**, v. esp., p. 38-51, 2012.
- ROSS, J. L. S.; MOROZ, I. C. Mapa geomorfológico do estado de São Paulo. **Revista do Departamento de Geografia**, n. 10, p. 41-58, 1996.
- ROSSI, M. **Mapa pedológico do Estado de São Paulo: revisado e ampliado**. São Paulo: Instituto Florestal, 2017. v. 1.
- SAATY, T. L. **The analytic hierarchy process: planning, priority setting, resource allocation**. New York: McGraw-Hill International, 1980.
- SAATY, T. L. **Theory and Applications of the Analytic Network Process: Decision Making with Benefits, Opportunities, Costs, and Risks**. Pittsburgh: RWS Publications, 2005.
- SÃO PAULO (Estado). Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE). **Banco de Dados Hidrológicos**. Seção Hidrologia. São Paulo: DAEE, [2025]. Disponível em: <https://hidrologia.spaguas.sp.gov.br/Default.aspx?dadosorigem=Pluviom%C3%A9tricos&ugrhi>. Acesso em: 18 nov. 2025.
- SOUZA, C. M. *et al.* Reconstructing Three Decades of Land Use and Land Cover Changes in Brazilian Biomes with Landsat Archive and Earth Engine. **Remote Sensing**, v. 12, n. 17, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs12172735>. Acesso em: 22 ago. 2025.
- TRAFICANTE, D. P. **Fragilidade ambiental da APA Corumbataí-Botucatu-Tejupá (perímetro Botucatu, SP, Brasil) na bacia hidrográfica do Rio Capivara**. 2016. Tese (Doutorado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2016.
- TRAFICANTE, D. P. *et al.* Fragilidade ambiental da bacia hidrográfica do Rio Capivara, Botucatu-SP. **Energia na Agricultura**, v. 32, n. 1, p. 88-95, 2017. Disponível em: <https://revistas.fca.unesp.br/index.php/energia/article/view/2335>. Acesso em: 28 ago. 2025.
- TUCCI, C. E. M. **Gestão de águas pluviais urbanas**. Brasília, DF: Ministério das Cidades, 2005.
- TUCCI, C. E. M.; BERTONI, J. C. **Inundações urbanas na América do Sul**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2003.