

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CENTRO- OESTE, UNICENTRO-PR

**QUALIDADE DO SOLO E DA ÁGUA NA ÁREA DE
PRESERVAÇÃO PERMANENTE DA BACIA DO RIO
DAS ANTAS - PARANÁ**

TESE DE DOUTORADO

GUILHERME GAVLAK

IRATI - PR

2024

GUILHERME GAVLAK

**QUALIDADE DO SOLO E DA ÁGUA NA ÁREA DE PRESERVAÇÃO
PERMANENTE DA BACIA DO RIO DAS ANTAS - PARANÁ**

Tese de Doutorado apresentada à
Universidade Estadual do Centro-Oeste,
como parte das exigências do Programa de
Pós-Graduação em Ciências Florestais, área
de concentração em Geotecnologia Florestal,
para a obtenção do título de Doutor.

Prof. Dr. Paulo Costa de Oliveira Filho

Orientador

Prof. Dra. Kelly Geronazzo Martins

Coorientadora

Prof. Dra. Kátia Cylene Lombardi

Coorientadora

IRATI - PR

2024

Catálogo na Publicação
Rede de Bibliotecas da UNICENTRO

G283q Gavlak, Guilherme
Qualidade do solo e da água na área de preservação permanente da
Bacia do Rio das Antas – Paraná / Guilherme Gavlak. -- Irati, 2024.
xi, 92 f. : il. ; 28 cm

Tese (doutorado) - Universidade Estadual do Centro-Oeste, Programa
de Pós-Graduação em Ciências Florestais, área de concentração em
Geotecnologia Florestal, 2024.

Orientador: Paulo Costa de Oliveira Filho

Coorientadora: Kelly Geronazzo Martins

Coorientadora: Kátia Cylene Lombardi

Banca examinadora: Paulo Costa de Oliveira Filho, Marcos Vinícius
Winckler Caldeira, Gerson dos Santos Lisboa, Carlos Magno de Sousa
Vidal, João Anésio Bednarz

Bibliografia

1. Autodepuração. 2. Ecotoxicidade. 3. Filtros biológicos. 4. Serviços
ecossistêmicos. 5. Sensoriamento remoto. 6. Fertilidade do solo. 7. Área de
preservação permanente. 8. Biomonitoramento. 9. Índice de qualidade da
água. 10. *Daphnia magna*. I. Título. II. Programa de Pós-Graduação em
Ciências Florestais.

CDD 634.9



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CENTRO-OESTE/UNICENTRO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO - PROPESP
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS - PPGF



TERMO DE APROVAÇÃO

Defesa Nº 54

Guilherme Gavlak

"QUALIDADE DO SOLO E DA ÁGUA NA ÁREA DE PRESERVAÇÃO PERMANENTE DA BACIA DO RIO DAS ANTAS - PARANÁ"

Tese aprovada em 14/03/2024, como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor, no Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, área de concentração em Manejo Sustentável de Recursos Florestais, da Universidade Estadual do Centro-Oeste, pela seguinte Banca Examinadora:

Prof. Dr. Marcos Vinícius Winckler Caldeira
Universidade Federal do Espírito Santo
Primeiro Examinador

Prof. Dr. Gerson dos Santos Lisboa
Universidade Federal de Goiás
Segundo Examinador

Prof. Dr. Carlos Magno de Sousa Vidal
Universidade Estadual do Centro-Oeste
Terceiro Examinador

Prof. Dr. João Anésio Bednarz
Universidade Estadual do Centro-Oeste
Quarto Examinador

Prof. Dr. Paulo Costa de Oliveira Filho
Universidade Estadual do Centro-Oeste
Orientador e Presidente da Banca Examinadora

Irati – PR
2024

Home Page: <http://www.unicentro.br>

Campus Santa Cruz: Rua Salvatore Renna-Padre Salvador, 875, Bairro Santa Cruz – Cx. Postal 3010 – Fone: (42) 3621-1000 – FAX: (42) 3621-1090 CEP 85.015-430 – GUARAPUAVA – PR

Campus Cedeteg: Alameda Élio Antonio Dalla Vecchia, 838, Bairro Vila Carli – Fone: (42) 3629-8100 – CEP 85.040-167 – GUARAPUAVA – PR

Campus de Irati: Rua Professora Maria Roza Zanon de Almeida, Bairro Engenheiro Gutierrez – Cx. Postal, 21 – Fone: (42) 3421-3000 CEP 84.505-677 – IRATI – PR

Correspondência Interna 172/2024. Assinatura Avançada realizada por: **Carlos Magno de Sousa Vidal (XXX.701.698-XX)** em 15/03/2024 21:05 Local: UNICE/DENAM, **Guilherme Gavlak (XXX.345.609-XX)** em 17/03/2024 10:43 Local: CIDADAO. Assinatura Simples realizada por: **João Anésio Bednarz (XXX.408.839-XX)** em 15/03/2024 15:24 Local: CIDADAO, **Paulo Costa de Oliveira Filho (XXX.182.969-XX)** em 15/03/2024 15:55 Local: CIDADAO, **Gerson dos Santos Lisboa (XXX.887.659-XX)** em



ePROTOCOLO

Correspondência Interna 172/2024.

Documento: **ataetermodeaprovacao.pdf**.

Assinatura Avançada realizada por: **Carlos Magno de Sousa Vidal (XXX.701.698-XX)** em 15/03/2024 21:05 Local: UNICE/DENAM, **Guilherme Gavlak (XXX.345.609-XX)** em 17/03/2024 10:43 Local: CIDADAO.

Assinatura Simples realizada por: **João Anésio Bednarz (XXX.408.839-XX)** em 15/03/2024 15:24 Local: CIDADAO, **Paulo Costa de Oliveira Filho (XXX.182.969-XX)** em 15/03/2024 15:55 Local: CIDADAO, **Gerson dos Santos Lisboa (XXX.887.659-XX)** em 17/03/2024 17:00 Local: CIDADAO, **Marcos Vinicius Winckler Caldeira (XXX.210.070-XX)** em 18/03/2024 08:26 Local: CIDADAO.

Inserido ao documento **776.751** por: **Silvana Aparecida Kowalski** em: 15/03/2024 14:58.



Documento assinado nos termos do Art. 38 do Decreto Estadual nº 7304/2021.

A autenticidade deste documento pode ser validada no endereço:
<https://www.eprotocolo.pr.gov.br/spiweb/validarDocumento> com o código:
581319ee98baf460d223200409f66108.

*“É muito melhor lançar-se em busca de conquistas grandiosas,
mesmo expondo-se ao fracasso, do que alinhar-se com os
pobres de espírito, que nem gozam muito nem sofrem muito,
porque vivem numa penumbra cinzenta, onde não conhecem
nem vitória, nem derrota.”*

Theodore Roosevelt

“Maktub”

Ao meu pai, dedico.

AGRADECIMENTOS

Expresso meu profundo agradecimento a Deus por conceder-me vida, força e perseverança, permitindo-me alcançar este ponto da jornada, onde consegui equilibrar as demandas do doutorado, pós-graduação e do trabalho, suportando ainda uma pandemia.

A minha mãe Alda Maria Gavlak por sempre me apoiar e servir como base em tudo, juntamente ao meu padrasto Juarez por se dispor a me ajudar todas as vezes que precisei. Agradeço imensamente também ao meu falecido pai Miguel Gavlak, tenho certeza de que ele sempre esteve comigo nesta jornada, me apoiando e me cuidando de alguma forma.

Ao Eduardo Gasparelo e ao Gabriel Vitor Menon, meus grandes amigos os quais eu levo pra vida toda, por me ajudarem a realizar as coletas das amostras de água e de solo.

Agradeço muito a Odimeia Teixeira do Laboratório de Solos do Departamento de Engenharia Florestal por todo ensinamento e conhecimento repassado.

Agradeço ao Departamento de Engenharia Ambiental por aceitarem que eu pudesse fazer as análises das amostras de qualidade da água, em especial ao Carlos Raphael Pedroso, a Ana Charnei e ao Carlos Magno de Souza Vidal.

Agradeço imensamente ao meu orientador Prof. Dr. Paulo Costa de Oliveira Filho e as minhas coorientadoras Prof. Dra. Kelly Geronazzo Martins e Prof. Dra. Kátia Cylene Lombardi.

Agradeço aos meus colegas de classe Marshall, Lucas e Javan, meus companheiros nessa jornada e ao Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais da Universidade Estadual do Centro-Oeste, em especial a Silvana.

Sou grato a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (Capes) pela concessão da bolsa de doutorado mesmo que por poucos meses.

SUMÁRIO	Página
LISTA DE FIGURAS	I
LISTA DE TABELAS	III
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS	V
RESUMO GERAL	IX
GENERAL ABSTRACT	X
1. INTRODUÇÃO GERAL	1
2. OBJETIVO GERAL	3
2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	4
CAPÍTULO I – AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO USO E OCUPAÇÃO DA TERRA NA RELAÇÃO ENTRE FERTILIDADE DO SOLO EM ÁREAS DE PRESERVAÇÃO PERMANENTE E A QUALIDADE DAS ÁGUAS DOS CORPOS HÍDRICOS.....	5
RESUMO	5
ABSTRACT	6
HIPÓTESE	6
1. INTRODUÇÃO	7
2. MATERIAL E MÉTODOS	8
2.1 Descrição da área avaliada	8
2.2 Avaliação do uso e ocupação da terra na bacia hidrográfica do Rio das Antas	10
2.3 Coleta de amostras	12
2.4 Coleta das unidades amostrais de solo da APP do Rio das Antas	13

2.5 Coleta das amostras de água do Rio das Antas e cálculo do índice de qualidade da água	14
2.6 Análise estatística dos dados	16
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	17
3.1 Avaliação e descrição do uso e ocupação da terra na bacia hidrográfica do Rio das Antas	17
3.2 Avaliação da qualidade da água do Rio das Antas	21
3.3 Avaliação da fertilidade do solo na APP do Rio das Antas	23
3.4 Avaliação entre relação uso e ocupação da terra e fertilidade do solo na qualidade da água	26
4. CONCLUSÕES	33
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	33

CAPÍTULO II: AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO USO E OCUPAÇÃO DA TERRA NA QUALIDADE DAS ÁGUAS DOS CORPOS HÍDRICOS EM DIFERENTES CONDIÇÕES CLIMÁTICAS	37
--	-----------

RESUMO	37
---------------	-----------

ABSTRACT	38
-----------------	-----------

HIPÓTESE	39
-----------------	-----------

1. INTRODUÇÃO	39
----------------------	-----------

2. MATERIAL E MÉTODOS	41
------------------------------	-----------

2.1 Caracterização do relevo e do uso e ocupação da terra da bacia hidrográfica do Rio das Antas	42
---	-----------

2.1.1 Obtenção dos dados de elevação da Bacia Hidrográfica do Rio das Antas	43
--	-----------

2.1.2 Elaboração do mapa hipsométrico de elevação da Bacia Hidrográfica do Rio das Antas	43
---	-----------

2.1.3	Elaboração do mapa de declividade da Bacia Hidrográfica do Rio das Antas	44
2.1.4	Elaboração do mapa de uso e ocupação da terra da Bacia Hidrográfica do Rio das Antas	44
2.2	Implementação dos locais de coleta e execução da amostragem da água do Rio das Antas	46
2.3	Análises laboratoriais das amostras e cálculo do índice de qualidade da água	47
2.4	Análise estatística dos dados	49
3.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
3.1	Análise espacial do relevo da área de estudo	50
3.2	Caracterização do uso e ocupação da terra	53
3.3	Avaliação da qualidade da água do Rio das Antas em função do uso e ocupação da terra e das condições climáticas	56
3.3.1	Avaliação do Índice de Qualidade da Água	56
3.3.2	Avaliação do comportamento dos parâmetros de qualidade da água em função das condições climáticas avaliadas	58
3.3.3	Análise de componentes principais	62
4.	CONCLUSÕES	64
5.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64
CAPÍTULO III: RELAÇÕES ENTRE ECOTOXICOLOGIA DE ÁGUAS FLUVIAS E USO E OCUPAÇÃO DA TERRA		
		69
RESUMO		69
ABSTRACT		70
HIPÓTESE		70
1. INTRODUÇÃO		71

2. MATERIAL E MÉTODOS	73
2.1 Descrição da área de estudo	73
2.2 Adoção dos pontos de amostragem e coleta das amostras	74
2.3 Análises de ecotoxicidade da água do Rio das Antas	75
2.4 Avaliação do uso e ocupação da terra na bacia hidrográfica do Rio das Antas	76
2.5 Análise estatística dos dados	79
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	79
3.1 Avaliação do uso e ocupação da terra	79
3.2 Avaliação ecotoxicológica das amostras em função do uso e ocupação da terra	83
4. CONCLUSÕES	86
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87
CONSIDERAÇÕES FINAIS DA TESE	91

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I – AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO USO E OCUPAÇÃO DA TERRA NA RELAÇÃO ENTRE FERTILIDADE DO SOLO EM ÁREAS DE PRESERVAÇÃO PERMANENTE E A QUALIDADE DAS ÁGUAS DOS CORPOS HÍDRICOS

Figura 1. Localização da Bacia Hidrográfica do Rio das Antas	9
Figura 2. Esquema utilizado para realização das coletas de amostras de solo	13
Figura 3. Localização dos pontos de amostragem da água do Rio das Antas e seus respectivos <i>buffers</i>	19
Figura 4. Atribuição do índice de qualidade da água para os pontos avaliados	21
Figura 5. Análise de correspondência canônica entre parâmetros de qualidade da água e elementos da paisagem e variáveis de fertilidade do solo no Rio das Antas em Irati-PR	28
Figura 6. Variáveis de uso e ocupação da terra que influenciaram no índice de qualidade da água dos pontos de amostragem	30
Figura 7. Variáveis de fertilidade do solo que influenciaram no índice de qualidade da água nos pontos amostrados	31
Figura 8. Representação esquemática da relação entre usos da terra, fertilidade do solo e índice de qualidade da água	32

CAPÍTULO II – AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO USO E OCUPAÇÃO DA TERRA NA QUALIDADE DAS ÁGUAS DOS CORPOS HÍDRICOS EM DIFERENTES CONDIÇÕES CLIMÁTICAS.

Figura 1. Localização geográfica da Bacia Hidrográfica do Rio das Antas	42
Figura 2. Mapa hipsométrico de elevação da Bacia Hidrográfica do Rio das Antas	50
Figura 3. Mapa de declividade da Bacia Hidrográfica do Rio das Antas	52

Figura 4. Mapa de uso e ocupação da terra da Bacia Hidrográfica do Rio das Antas contendo os respectivos pontos amostrais	53
Figura 5. Valores do índice de qualidade da água obtidos em cada um dos pontos de amostragem nas suas respectivas condições climáticas	57
Figura 6. Diagrama de ordenação da análise de componentes principais pertinente a matriz da qualidade da água de 14 pontos do Rio da Antas em Irati PR	62

CAPÍTULO III – RELAÇÕES ENTRE ECOTOXICOLOGIA DE ÁGUAS FLUVIAS E USO E OCUPAÇÃO DA TERRA.

Figura 1. Localização geográfica da Bacia Hidrográfica do Rio das Antas	75
Figura 2. Mapeamento do uso e ocupação da terra na Bacia Hidrográfica do Rio das Antas ..	80
Figura 3. Localização dos pontos de amostragem da água do Rio das Antas e seus respectivos <i>buffers</i> de 400 metros	81

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO I – AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO USO E OCUPAÇÃO DA TERRA NA RELAÇÃO ENTRE FERTILIDADE DO SOLO EM ÁREAS DE PRESERVAÇÃO PERMANENTE E A QUALIDADE DAS ÁGUAS DOS CORPOS HÍDRICOS.

Tabela 1. Classificação dos valores do índice Kappa para a classificação do uso e ocupação da terra	12
Tabela 2. Distribuição geográfica dos pontos de amostragem	18
Tabela 3. Porcentagens dos usos avaliados nos pontos de amostragem	19
Tabela 4. Caracterização da fertilidade do solo da APP do Rio das Antas nos pontos de amostragem avaliados	24
Tabela 5. Resultados da construção de modelos, distribuição normal utilizando da função log	29

CAPÍTULO II – AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO USO E OCUPAÇÃO DA TERRA NA QUALIDADE DAS ÁGUAS DOS CORPOS HÍDRICOS EM DIFERENTES CONDIÇÕES CLIMÁTICAS.

Tabela 1. Interpretação dos valores do índice Kappa para a classificação do uso e ocupação da terra	46
Tabela 2. Quantidade de área pertencente a cada uso e ocupação da terra avaliado e suas respectivas porcentagens em função da área total da bacia hidrográfica	54
Tabela 3. Quantidade de área pertencente a cada uso e ocupação da terra avaliado e suas respectivas porcentagens em função da área total do <i>buffer</i>	54
Tabela 4. Análise de <i>clusters</i> e formação de agrupamentos em função das porcentagens dos usos e ocupações da terra nos <i>buffers</i> avaliados	55
Tabela 5. Teste de médias aplicado aos pontos de amostragem em função dos usos da terra, da condição climática e dos parâmetros de qualidade da água	59

CAPÍTULO III – RELAÇÕES ENTRE ECOTOXICOLOGIA DE ÁGUAS FLUVIAS E USO E OCUPAÇÃO DA TERRA.

Tabela 1. Classificação dos valores do índice Kappa para a classificação do uso e ocupação da terra	78
Tabela 2. Porcentagem de cada uso e ocupação da terra avaliado em seus respectivos <i>buffers</i> dos pontos de amostragem adotados	82
Tabela 3. Teste de médias aplicado aos pontos de amostragem em função dos dados de ecotoxicidade em relação ao número de indivíduos imóveis	83
Tabela 3. Componentes dos grupos gerados na análise de agrupamento a partir da matriz de dados das variáveis de uso e ocupação da terra e toxicidade de 14 unidades amostrais localizadas ao longo do Rio das Antas em Irati- Paraná	84
Tabela 4. Médias e valores do teste t para os diferentes agrupamentos encontrados na matriz de dados do uso e ocupação da terra e toxicidade do Rio das Antas em Irati no Paraná	85

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

CAPÍTULO I – AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO USO E OCUPAÇÃO DA TERRA NA RELAÇÃO ENTRE FERTILIDADE DO SOLO EM ÁREAS DE PRESERVAÇÃO PERMANENTE E A QUALIDADE DAS ÁGUAS DOS CORPOS HÍDRICOS

<i>APP</i>	Área de Preservação Permanente
<i>IQA</i>	Índice de qualidade da água
<i>B.H.</i>	Bacia hidrográfica
<i>UC</i>	Unidade de conservação
<i>ITCG</i>	Instituto Terras, Cartografia e Geologia do Paraná
<i>IAT</i>	Instituto Água e Terra
<i>INPE</i>	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
<i>ETE</i>	Estação de tratamento de esgotos
<i>Al</i>	Alumínio
<i>MO</i>	Matéria orgânica
<i>P</i>	Fósforo
<i>K</i>	Potássio
<i>Ca</i>	Cálcio
<i>Cl</i>	Cloro
<i>Mg</i>	Magnésio
<i>CTC</i>	Capacidade de troca catiônica
<i>SB</i>	Soma das bases
<i>V%</i>	Saturação das bases
<i>ANA</i>	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico

<i>CETESB</i>	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
<i>NSF</i>	<i>National Sanitation Foundation Institution</i>
<i>GLM</i>	Modelos lineares generalizados mistos
<i>FLONA</i>	Floresta Nacional
<i>E. coli</i>	<i>Escherichia coli</i>
<i>N</i>	Nitrogênio
<i>Turb.</i>	Turbidez
<i>OD.</i>	Oxigênio dissolvido
<i>CCA</i>	Análise de Correlação Canônica
<i>pH</i>	Potencial hidrogênio
<i>RT</i>	Resíduos totais

CAPÍTULO II – AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO USO E OCUPAÇÃO DA TERRA NA QUALIDADE DAS ÁGUAS DOS CORPOS HÍDRICOS EM DIFERENTES CONDIÇÕES CLIMÁTICAS.

<i>APP</i>	Área de Preservação Permanente
<i>IQA</i>	Índice de qualidade da água
<i>ITCG</i>	Instituto Terras, Cartografia e Geologia do Paraná
<i>IAT</i>	Instituto Água e Terra
<i>INPE</i>	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
<i>ETE</i>	Estação de tratamento de esgotos
<i>P</i>	Fósforo
<i>ANA</i>	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
<i>CETESB</i>	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

<i>NSF</i>	<i>National Sanitation Foundation Institution</i>
<i>FLONA</i>	Floresta Nacional
<i>E. coli</i>	<i>Escherichia coli</i>
<i>N</i>	Nitrogênio
<i>Turb.</i>	Turbidez
<i>OD.</i>	Oxigênio dissolvido
<i>pH</i>	Potencial hidrogênio
<i>RT</i>	Resíduos totais
<i>SRC</i>	Sistema de Referência Cartográfica
<i>NASA</i>	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
<i>ASF</i>	<i>Alaska Satelite Facility</i>
<i>MDE</i>	Modelo digital de elevação
<i>ACP</i>	Análise de componentes principais
<i>Reflores.</i>	Reflorestamento
<i>Pastag.</i>	Pastagem
<i>Solo exp.</i>	Solo exposto
<i>Agricult.</i>	Agricultura
<i>Area urb.</i>	Área urbana
<i>Veget.</i>	Vegetada

CAPÍTULO III – RELAÇÕES ENTRE ECOTOXICOLOGIA DE ÁGUAS FLUVIAS E USO E OCUPAÇÃO DA TERRA.

<i>APP</i>	Área de Preservação Permanente
<i>ITCG</i>	Instituto Terras, Cartografia e Geologia do Paraná

<i>IAT</i>	Instituto Água e Terra
<i>INPE</i>	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
<i>ETE</i>	Estação de tratamento de esgotos
<i>FLONA</i>	Floresta Nacional
<i>SRC</i>	Sistema de Referência Cartográfica
<i>SIG</i>	Sistema de informações geográficas

RESUMO GERAL

Estudos sobre a relação entre o uso e ocupação da terra e sua relação com a fertilidade dos solos, qualidade e toxicidade das águas dos corpos hídricos são extremamente importantes para a preservação dos ecossistemas. O estudo buscou avaliar a influência do uso da terra em Área de Preservação Permanente (Mata Atlântica) de Floresta Ombrófila Mista Aluvial na fertilidade do solo, qualidade e ecotoxicidade dos cursos hídricos. Foi realizado o mapeamento dos usos e ocupação da terra na bacia hidrográfica do Rio das Antas, selecionados 14 pontos de amostragem no rio principal e gerado *buffers* de 400 metros a partir destes. Foram coletadas amostras da água do rio sem que houvesse precipitação na área da bacia e submetidas a caracterização referentes aos parâmetros do índice de qualidade da água (IQA) e amostras de solo da APP nos pontos de amostragem, seguidas da realização de análises de fertilidade. Realizou-se testes estatísticos por meio de modelos lineares generalizados mistos e análise de correspondência canônica para verificar a relação destas variáveis. Coletou-se amostras de água também após a ocorrência de um evento pluviométrico, e calculou-se novamente o IQA de cada ponto. Realizou-se a análise de variância, clusterização e de componentes principais (ACP) para investigar a diferença na qualidade da água em função da chuva, dos pontos de amostragem e do uso e ocupação da terra. Na ausência de evento de pluviosidade, foi realizado bioensaios ecotoxicológicos da água utilizando neonatos do microcrustáceo *Daphnia magna* e posteriormente relacionado os dados com o uso e ocupação da terra por meio das análises de *clusters*, de variância e do teste t. A vegetação nativa na APP impactou positivamente nos teores de material orgânico, fósforo, cálcio e no pH em CaCl_2 do solo e está associada a baixos teores de material orgânico, e alumínio na água e melhores índices de qualidade. Já as áreas urbanas, baixo material orgânico e altos teores de alumínio no solo e reduzida qualidade da água. Ao comparar as condições climáticas, obteve-se maiores valores de IQA após a ocorrência da chuva e nos locais vegetados. Na ACP, explicando cerca de 61,3%, houve uma correlação com as variáveis: IQA, OD e pH, de maneira positiva, e negativamente com: P, N, DBO e *E.coli*, sofrendo influência da condição climática amostrada e do uso e ocupação. Com 22,5% de explicação, correlacionaram-se os parâmetros de turbidez, temperatura e resíduos totais, influenciados pela chuva e pelo uso e ocupação da terra. Além disso, o uso e ocupação da terra influenciou diretamente na ecotoxicidade da água de forma a impactá-la (áreas urbanas) ou preservá-la (áreas de floresta nativa) a depender do uso. Portanto, conclui-se que as áreas

vegetadas atuam de maneira intrínseca e positiva na fertilidade dos solos das APPs e na preservação da qualidade e ecotoxicidade das águas dos corpos hídricos.

Palavras-Chave: Autodepuração, ecotoxicidade, filtros biológicos, serviços ecossistêmicos.

GENERAL ABSTRACT

Studies on the relationship between land use and occupation and their relation to soil fertility, water quality, and toxicity of water bodies are extremely important for ecosystem preservation. The study aimed to evaluate the influence of land use in a Permanent Preservation Area (Atlantic Forest) of Mixed Alluvial Ombrophilous Forest on soil fertility, water quality, and ecotoxicity of watercourses. Land use and occupation mapping were carried out in the Antas River watershed, with 14 sampling points selected on the main river and 400-meter buffers generated from these. Water samples were collected from the river without precipitation in the basin area and subjected to characterization regarding water quality index (WQI) parameters, and soil samples from the APP at sampling points, followed by fertility analyses. Statistical tests were performed using mixed generalized linear models and canonical correspondence analysis to verify the relationship between these variables. Water samples were also collected after a rainfall event, and WQI was recalculated for each point. Analysis of variance, clustering, and principal component analysis (PCA) were performed to investigate differences in water quality due to rainfall, sampling points, and land use and occupation. In the absence of rainfall, ecotoxicological bioassays of water were performed using neonates of the microcrustacean *Daphnia magna*, and the data were subsequently related to land use and occupation through cluster analyses, variance, and t-test. Native vegetation in the APP positively impacted organic matter, phosphorus, calcium levels, and soil pH in CaCl₂, and was associated with low levels of organic matter and aluminum in water and better quality indices. Conversely, urban areas showed low organic matter and high aluminum levels in soil and reduced water quality. When comparing climatic conditions, higher WQI values were obtained after rainfall and in vegetated areas. In PCA, explaining about 61.3%, there was a positive correlation with the variables: WQI, dissolved oxygen, and pH, and negative correlation with: phosphorus, nitrogen, biochemical oxygen demand, and E.coli, influenced by the climate conditions and land use and occupation. With 22.5% of explanation, turbidity, temperature, and total residues parameters were correlated, influenced by rainfall and land use and occupation. Additionally, land use and

occupation directly influenced water ecotoxicity, impacting it (urban areas) or preserving it (native forest areas) depending on the use. Therefore, it is concluded that vegetated areas act intrinsically and positively on soil fertility in PPAs and on the preservation of water quality and ecotoxicity of water bodies.

Keywords: Self-purification, ecotoxicity, biological filters, ecosystem services.

1. INTRODUÇÃO GERAL

Na região Sul do território brasileiro, mais precisamente no estado do Paraná, a tipologia florestal predominante é conhecida como Floresta Ombrófila Mista a qual é marcada pela presença da *Araucária angustifolia* (Bertol) e suas características incluem clima temperado, geadas frequentes e alto índice pluviométrico associado à isoterma de 18°C (BACKES, 1999), o que é corroborado por Oliveira *et al.*, (2013), segundo ele, a distribuição destas florestas está diretamente correlacionada com a maior nebulosidade, precipitação e ocorrência de geadas, assim como, a temperaturas mais inferiores.

Esse tipo de vegetação quando localizada próxima aos corpos hídricos, é conhecida como Floresta Ombrófila Mista Aluvial, resultando na presença de espécies adaptadas a ambientes mais alagadiços e úmidos, e na interação única entre árvores, solo e recursos hídricos as quais conferem características distintas a esse tipo de floresta. Nessas regiões são encontradas as florestas ripárias, também conhecidas como matas ciliares (LORENZI, 2002). Essa interação origina os chamados filtros biológicos que atuam como serviços ecossistêmicos, que por sua vez possuem grande importância na melhoria da qualidade da água dos rios em bacias hidrográficas. Em determinadas situações, os parâmetros ambientais exercem a função de filtros, resultando na influência direta sobre os atributos funcionais e as estratégias ecológicas das plantas que incluem fatores como disponibilidade de água, nutrientes do solo, temperatura e luminosidade, atuam como determinantes na adaptação e na resposta das plantas ao ambiente em que estão inseridas de forma a preservá-lo (NEGREIROS *et al.* 2014).

O uso e ocupação da terra desempenham um papel crucial na eficácia desses serviços, pois o desmatamento, a urbanização desordenada e práticas agrícolas inadequadas podem comprometer a capacidade da bacia hidrográfica em fornecer esses benefícios naturais. Haja vista que, mesmo com a criação de diversas leis para preservar e conservar esse tipo de floresta, na atualidade, elas sofrem intensamente com a exploração madeireira e o avanço das atividades antrópicas, sendo os principais responsáveis pela supressão dos escassos remanescentes florestais desta tipologia florestal (MARTINELLI; MORAES, 2013). Por outro lado, práticas sustentáveis de manejo da terra, preservação de áreas naturais e o planejamento urbano consciente podem promover a integridade dos serviços ecossistêmicos. Portanto, compreender e preservar os serviços ecossistêmicos nas bacias hidrográficas é essencial para garantir a

eficácia dos filtros biológicos naturais, promovendo, assim, a melhoria contínua na qualidade das águas superficiais e subterrâneas, assim como a sustentabilidade ambiental em longo prazo.

Assim como em relação a influência positiva dos serviços ecossistêmicos na qualidade da água dos rios, é importante destacar sua contribuição para a saúde do solo nas bacias hidrográficas, principalmente nas áreas ripárias, próximas aos corpos hídricos, uma vez que, os ecossistemas naturais, com presença de vegetação nativa, desempenham um importante papel na manutenção da qualidade do solo. A vegetação e os microorganismos presentes nos mesmos possuem funções essenciais, como a filtragem de poluentes advindos do escoamento superficial, a retenção de nutrientes, a prevenção da erosão e servem de barreira para não ocupação humana, uma vez que esses processos contribuem para a manutenção da fertilidade do solo e sua capacidade de sustentar a vida vegetal.

Além da influência direta do uso e ocupação da terra nas bacias hidrográficas que possuem tecido urbano, assim como, com características agricultáveis, na qualidade das águas e do solo, o avanço antrópico pode afetar na toxicidade dos corpos hídricos resultando em uma desestabilização ecológica representando uma considerável ameaça aos ecossistemas aquáticos locais (LARSON *et al.*, 2019). Conseqüentemente, a abordagem integrada desses fatores, juntamente com o uso e ocupação da terra, principalmente em função da redução do desmatamento nas áreas de preservação permanente próximas aos corpos hídricos, é essencial para promover a sustentabilidade ambiental em ecossistemas terrestres e aquáticos.

Portanto, o monitoramento das ações humanas no meio ambiente torna-se imprescindível para frear tal degradação ambiental, o qual pode ser realizado por técnicas de sensoriamento remoto. A aplicação de sensores e sistemas de imageamento para a aquisição de dados relativos ao uso e ocupação da terra, tem experimentado uma ampla disseminação. Esse enfoque tecnológico tem se revelado essencial na obtenção de informações precisas e abrangentes sobre os padrões de utilização do solo, contribuindo significativamente para a avaliação e gestão eficaz dos recursos naturais em diferentes contextos ambientais (MWAJENGO *et al.*, 2020)

Sendo assim, a análise da bacia hidrográfica com tecido urbano abordada no presente estudo revela-se como uma abordagem propícia para estabelecer um modelo representativo, fornecendo *insights* valiosos e informações relevantes para o avanço e aprimoramento de instrumentos destinados ao gerenciamento eficiente de rios urbanos e que atravessam essas

áreas. Essa investigação abrange uma compreensão ampla dos elementos hidrológicos, ambientais e de uso e ocupação da terra dentro da bacia, oferecendo, assim, uma base sólida para o desenvolvimento de estratégias e políticas específicas voltadas para a preservação e otimização dos recursos hídricos em ambientes urbanos.

Cabe destacar que os capítulos desta tese podem ser lidos de forma independente, uma vez que a área de estudo é a mesma e os dados de uso e ocupação da terra da bacia hidrográfica do Rio das Antas se repetem nos três capítulos, porém são abordados e investigados de formas diferentes.

2. OBJETIVO GERAL

A presente pesquisa tem como objetivo avaliar a influência do uso e ocupação da terra na área de preservação permanente da Floresta Ombrófila Mista Aluvial, na fertilidade do solo e na qualidade e toxicidade dos cursos hídricos urbanos e a atuação das áreas vegetadas como filtros biológicos.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Calcular o Índice de Qualidade da Água (IQA) no decorrer do rio principal na presença e ausência de evento pluviométrico e relacioná-lo com o uso e ocupação da terra da bacia hidrográfica;
- Avaliar a influência do uso e ocupação da terra na ecotoxicidade da água do Rio das Antas;
- Avaliar a influência da presença da Floresta Nacional de Irati na recuperação do Rio das Antas;
- Caracterizar a fertilidade do solo das APP do Rio das Antas nos pontos de amostragem adotados;
- Avaliar a influência do uso e ocupação da terra da área de estudo na fertilidade do solo das APP.
- Avaliar a relação entre uso e ocupação da terra da bacia hidrográfica, a fertilidade do solo da APP e a qualidade das águas do Rio das Antas.

3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BACKES, A. Condicionamento climático e distribuição geográfica de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze no Brasil - II. **Pesquisas - Botânica**, v.49, p. 31-51, 1999.
- LARSON, D. M.; DODDS, W. K.; VEACH, A.M. A remoção da vegetação ribeirinha lenhosa alterou substancialmente um ecossistema de córrego em uma bacia hidrográfica de pastagem não perturbada. **Ecossistemas**, v. 22, p. 64-76, 2019.
- LORENZI, H. Árvores Brasileiras: Manual de Identificação e Cultivo de Plantas Arbóreas Nativas do Brasil. São Paulo: Nova Odessa, **Instituto Plantarum**, 2002. 384p.
- MARTINELLI, G.; MORAES, M.A. Livro Vermelho da Flora do Brasil. Rio de Janeiro: **Instituto de Pesquisas Jardim Botânico do Rio de Janeiro**, 2013.
- MWAIJENGO, G. N.; VANSCHOENWINKEL, B.; DUBE, T.; NJAU, K. N.; BRENDONCK, L. Seasonal variation in benthic macroinvertebrate assemblages and water quality in an Afrotropical river catchment, northeastern Tanzania. **Limnologica**, v. 82, 125780, p. maio2020.
- NEGREIROS D.; LE S. S.; FERNANDES G. W.; RENNÓ H. C. CSR analysis of plant functional types in highly diverse tropical grasslands of harsh environments. **Plant Ecology** v. 215, p. 379-388, 2014.
- OLIVEIRA-FILHO, A. T.; BUDKE, J. C.; JARENKOW, J. A.; EISENLOHR, P. V.; NEVES, D. R. M. Delving into the variations in tree species composition and 30 richness across South American subtropical Atlantic and Pampean forests. **Journal of Plant Ecology**, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1093/jpe/rtt058>. Acesso em: out. 2023.

CAPÍTULO I – AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO USO E OCUPAÇÃO DA TERRA NA RELAÇÃO ENTRE FERTILIDADE DO SOLO EM ÁREAS DE PRESERVAÇÃO PERMANENTE E A QUALIDADE DAS ÁGUAS DOS CORPOS HÍDRICOS.

RESUMO

O crescimento populacional desordenado e as atividades humanas intensificadas geram impactos ambientais nas águas dos corpos hídricos e nos solos das Áreas de Preservação Permanente (APP). O presente estudo teve como objetivo avaliar a qualidade da água do Rio das Antas, a fertilidade do solo da APP e relacioná-los com o uso e ocupação da terra nas áreas próximas ao rio. Primeiramente foi realizado o mapeamento dos usos e ocupação da terra bacia hidrográfica do Rio das Antas e posteriormente selecionados 14 pontos de amostragem no rio principal da bacia. Nos pontos adotados foram coletadas amostras da água do rio na ausência de precipitação em pelo menos 7 dias consecutivos e submetidas a caracterização referentes aos parâmetros do índice de qualidade da água (IQA). Em seguida, foram coletadas amostras de solo da APP nos mesmos pontos de amostragem, de ambos os lados do rio (posteriormente combinadas) e realizado análises de fertilidade. Os dados indicam que a vegetação nas APPs é essencial para a fertilidade do solo, impactando positivamente matéria orgânica, fósforo, cálcio e pH em CaCl₂. A presença significativa de vegetação nativa está associada a maiores teores de matéria orgânica no solo, baixas concentrações de alumínio e melhores índices de qualidade da água. Por outro lado, áreas urbanizadas com baixo material orgânico, altas concentrações de alumínio e baixa qualidade da água mostram uma relação direta. Portanto, conclui-se que as áreas de preservação permanente que possuem sua vegetação preservada agem como filtros biológicos atuando na preservação e recuperação dos corpos hídricos, assim como, na preservação dos seus solos.

Palavras-chave: Sensoriamento remoto; Índice de qualidade da água; Autodepuração; Fertilidade do solo.

ABSTRACT

The uncontrolled population growth and intensified human activities generate environmental impacts on water bodies and soils of Permanent Preservation Areas (PPAs). This study aimed to evaluate the water quality of the Antas River, soil fertility of the PPA, and relate them to land use and occupation in areas near the river. Firstly, land use and occupation mapping was carried out in the Antas River watershed, and subsequently, 14 sampling points were selected along the main river of the basin. At the selected points, river water samples were collected in the absence of precipitation for at least 7 consecutive days and subjected to characterization regarding water quality index (WQI) parameters. Then, soil samples from the PPA were collected at the same sampling points, from both sides of the river (later combined), and fertility analyses were conducted. The data indicate that vegetation in PPAs is essential for soil fertility, positively impacting organic matter, phosphorus, calcium, and pH in CaCl₂. The significant presence of native vegetation is associated with higher levels of organic matter in the soil, low aluminum concentrations, and better water quality indices. On the other hand, urbanized areas with low organic matter, high aluminum concentrations, and poor water quality show a direct relationship. Therefore, it is concluded that permanent preservation areas with preserved vegetation act as biological filters contributing to the preservation and recovery of water bodies, as well as the preservation of their soils.

Keywords: Remote sensing; Water quality index; Self-purification,; Soil fertility.

HIPÓTESE

Os fatores relacionados ao uso e ocupação da terra, combinados com as propriedades químicas de fertilidade do solo, desempenham papéis determinantes como filtros na qualidade das águas superficiais, com ênfase específica na qualidade da água do Rio das Antas.

1. INTRODUÇÃO

Ao longo das últimas décadas, o considerável e expressivo crescimento e desenvolvimento urbano têm ocasionado uma série de atividades de natureza antrópica nas Áreas de Preservação Permanente (APP) dos cursos hídricos. Estas atividades englobam, entre outras, a significativa supressão de matas ciliares, a descarga de resíduos sólidos e de esgoto sem o devido tratamento e a indução de diversos outros impactos ambientais. Essas ações humanas têm contribuído para a degradação ambiental em curso nessas regiões. No contexto brasileiro, a expansão urbana desordenada, frequentemente carente de critérios técnicos adequados, tem exacerbado significativamente a modificação da cobertura natural e a transformação do uso do solo, resultando em sérios impactos nas áreas de mananciais (COSTA *et al.*, 2012; ALVIM *et al.*, 2015).

Esses impactos estão essencialmente associados ao aumento das concentrações de diversos elementos, como material orgânico, nutrientes, incluindo nitrogênio e fósforo, sólidos em suspensão, cor e turbidez, nos corpos hídricos que permeiam essas áreas. Como resultado, ocorre a diminuição dos níveis de oxigênio dissolvido na água, a redução da profundidade da zona eufótica e, conseqüentemente, uma diminuição nos processos fotossintéticos. Além disso, esses fatores podem contribuir para a ocorrência de processos de eutrofização e assoreamento nas regiões afetadas.

Em decorrência do crescimento populacional, avanço das cidades e da agricultura em APP, compreendem não apenas a qualidade das águas superficiais e subterrâneas, mas também a qualidade do solo e sua fertilidade. Isso ocorre principalmente devido aos processos erosivos predominantes nessas áreas, que resultam da remoção da cobertura vegetal. Esses processos estão associados à perda de solo, à deposição subsequente desse material nos leitos dos corpos d'água e à lixiviação dos nutrientes e da matéria orgânica do solo, contribuindo ainda para o aumento das concentrações desses elementos nas águas. Além disso, a compactação do solo, juntamente com a diminuição da sua espessura, tem como consequência uma diminuição significativa na capacidade de infiltração de água. Esse processo pode ocorrer devido à diminuição da porosidade do solo, o que restringe a absorção da água da chuva e aumenta a probabilidade de escoamento superficial, desencadeando a erosão do solo com maior intensidade e uma maior perda da fertilidade (COSTA *et al.*, 2012; OLIVEIRA *et al.*, 2020).

O aumento da densidade populacional e as atividades associadas têm influenciado de forma significativa esses aspectos ambientais, exigindo uma avaliação abrangente de seus efeitos e um planejamento adequado para mitigar impactos adversos. Diante desse cenário, torna-se necessário adotar um planejamento cuidadoso que promova uma ocupação racional das bacias hidrográficas. Essa abordagem visa a proteção e a restauração efetiva dessas áreas, bem como dos recursos hídricos a elas associados. A implementação de estratégias de gestão sustentável é essencial para mitigar os danos ambientais e garantir a preservação desses importantes ecossistemas aquáticos (BAIHUA FU *et al.*, 2019).

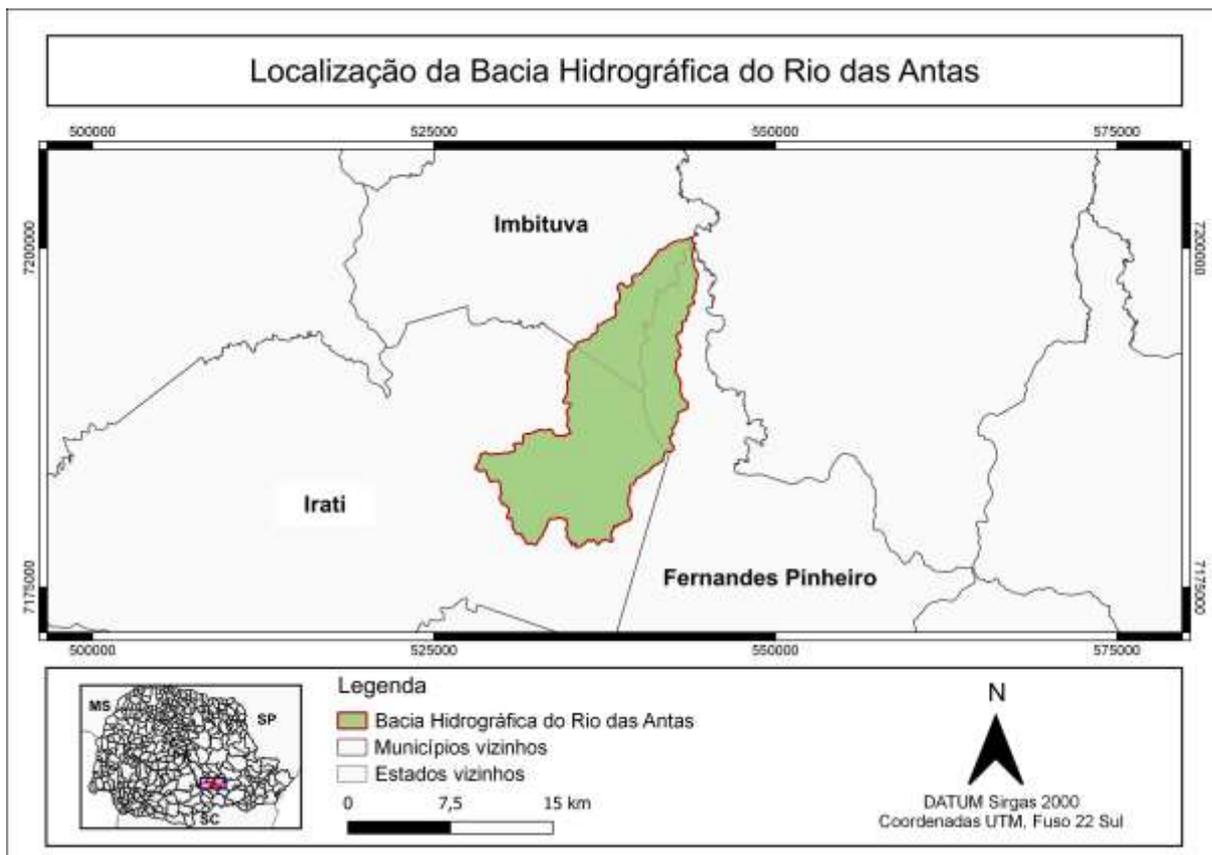
Diversas ferramentas são empregadas na gestão, monitoramento e preservação de APP e recursos hídricos em uma bacia ou microbacia hidrográfica. Entre essas ferramentas, merecem destaque os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e o Sensoriamento Remoto. Por meio da utilização dessas geotecnologias, que incluem a análise de imagens de satélite, dados topográficos como elevação e declividade, entre outros, é possível identificar áreas que podem estar sofrendo impactos adversos nessas regiões e quantificá-los, facilitando assim o monitoramento e a conservação dessas áreas (SENA, NETO, LEITE; 2012).

Todavia, o propósito deste estudo consistiu em investigar a relação entre as variáveis de fertilidade dos solos localizados nas áreas de preservação permanente ao longo do Rio das Antas e o impacto do uso e ocupação da terra na qualidade da água desse corpo hídrico.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Descrição da área avaliada

O estudo em questão foi conduzido na Bacia Hidrográfica do Rio das Antas, a qual abrange os municípios de Irati, Fernandes Pinheiro e Imbituva, situados no estado do Paraná, na região Sul do Brasil. Essa bacia é uma sub-região pertencente à Bacia Hidrográfica do Rio Tibagi, localizada dentro da Bacia do Rio Paraná. A localização geográfica da Bacia Hidrográfica do Rio das Antas está disposta na Figura 1.



Fonte: O Autor, 2024.

Figura 1. Localização da Bacia Hidrográfica do Rio das Antas.

Esta região é caracterizada por apresentar variação de temperatura considerável ($11,0^{\circ}\text{C}$ a $24,2^{\circ}\text{C}$), da mesma forma, os eventos pluviométricos, os quais tendem a variar de 4 mm a 175 mm em períodos considerados de seca e chuvosos, respectivamente (IAPAR, 2018). A região de coleta dos pontos de amostragem na área da bacia em estudo está situada em uma zona fitoecológica geralmente classificada como Floresta Ombrófila Mista. No entanto, devido à presença do corpo hídrico e suas áreas de várzea correspondentes, essa tipologia específica é identificada como Floresta Ombrófila Aluvial. Além disso, o tipo de solo predominante na região em estudo é caracterizado como Latossolo Vermelho distrófico segundo o Mapa de solos do estado do Paraná disponível na plataforma GEOINFO.

A bacia hidrográfica em análise é predominantemente drenada pelo Rio das Antas, que possui uma extensão de aproximadamente 80 quilômetros. De acordo com a Resolução Conama 357/2005, que estabelece a classificação dos corpos hídricos no Brasil, este rio é classificado

como Classe 2. A classificação do corpo hídrico avaliado não foi resultado de um enquadramento realizado pelo comitê de bacias, mas sim, utilizada como estratégia de preservação do mesmo, uma vez que os rios de águas doce brasileiros quando não realizados estudos de enquadramento e classificação, são considerados automaticamente como classe 2, a menos que as condições de qualidade atuais sejam superiores, isso determinará a adoção da classe mais rigorosa correspondente (BRASIL, 2005).

A maior parte do curso do Rio das Antas está localizada no município de Irati, a qual tem sua nascente na serra do bairro Nhapindazal, em uma região caracterizada por uma predominância significativa de áreas agrícolas. Ao longo de sua maior extensão, o rio atravessa a área urbana do município, tornando-se o principal corpo d'água da cidade. Mais adiante, o Rio das Antas deságua no Rio Imbituvão, onde sua foz está situada. Esse local é notável pela significativa preservação ambiental, graças à presença da Floresta Nacional de Irati, uma Unidade de Conservação (UC) de uso sustentável e de responsabilidade Federal criada no ano de 1968, possuindo cerca de 3,8 mil hectares (PPI, 2021).

2.2 Avaliação do uso e ocupação da terra na bacia hidrográfica do Rio das Antas

Para elaboração do mapa de uso e ocupação da terra da Bacia Hidrográfica do Rio das Antas, utilizou-se do *software QGIS, versão 3.12.3*. Primeiramente realizou-se a delimitação da bacia, utilizando os divisores de água e a identificação do seu afluente principal. Essa etapa foi realizada por meio de vetorização, e foi executada tomando como referência a carta geográfica da região com escala de 1:50.000 e uma resolução de escanerização de 300 *dpi*, disponível na base cartográfica do Instituto Terras, Cartografia e Geologia do Paraná (ITCG), cedida pelo Instituto Água e Terra (IAT).

Para a obtenção dos dados necessários à elaboração do mapa de uso e cobertura da terra, procedeu-se à coleta por meio do acesso e *download* de imagens disponíveis na plataforma digital mantida pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe). Foram adquiridas imagens do satélite CBERS4AWPM, com resolução espacial de 8 metros. A coleta abrangeu um período contínuo de um ano, de janeiro de 2022 a janeiro de 2023, na região de interesse geográfico correspondente à área de estudo. Após a identificação e seleção criteriosa das

imagens mais representativas e com baixa cobertura de nuvens, procedeu-se ao seu *download*, incluindo as bandas espectrais correspondentes aos comprimentos de onda do azul (450 a 495nm), vermelho (620 a 750nm), verde (495 a 570nm) e infravermelho (750nm a 1mm).

Posteriormente, foi conduzido o processo de georreferenciamento, recorte e fusão das imagens. Logo após, utilizando a extensão "*Semi-Automatic Classification*" no ambiente da função "*SCP dock*", conduziu-se a classificação supervisionada do uso e ocupação da terra. Essa classificação baseou-se em um conjunto de 50 unidades amostrais para cada categoria de uso, que incluiu floresta nativa, reflorestamento, pastagem, solo exposto, área urbana e agricultura. Depois da coleta das unidades amostrais e a associação de cores específicas a cada categoria, aplicou-se a função "processamento de banda - classificação" usando o algoritmo "*maximum likelihood*" para gerar a classificação supervisionada.

Subsequentemente, foi delineado um *buffer* com um raio de 400 metros a partir de cada um dos pontos de amostragem selecionados para realizar a análise de proximidade dos pontos, e realizado o recorte da área. A determinação do raio para a criação dos *buffers* foi baseada nos padrões de escala dos usos da terra identificados na bacia, uma vez que mudanças na qualidade da água dos corpos hídricos em um raio de até 500 metros podem influenciar negativamente a comunidade aquática, conforme estudos anteriores (YIRIGUI *et al.*, 2019; FRIEDEN *et al.*, 2014). Posteriormente, utilizando a ferramenta de processamento "*r.report*" do *software* Grass, calculou-se a área ocupada em cada categoria de uso dentro da região avaliada em cada ponto e suas respectivas porcentagens em relação à área total do *buffer*.

Para verificar a precisão da classificação do uso e ocupação da terra gerada, foi calculado o Índice Kappa (K) por meio da Equação 1.

$$K = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^y x_{ii} - \sum_{i=1}^y (x_{i+} \cdot x_{i+})}{n^2 - \sum_{i=1}^y (x_{i+} \cdot x_{i+})} \quad \text{(Equação 1)}$$

Em que:

$\sum_{i=1}^y x_{ii}$ = a soma da diagonal da matriz de confusão;

n = o número total de amostras que representam o uso e ocupação da terra e da cobertura observado no campo;

x_{i+} = a soma das linhas da matriz de confusão;

x_{+i} = a soma das colunas da matriz de confusão.

Por meio do índice calculado, foi realizada a interpretação do valor obtido para Kappa de acordo com a classificação disposta por Landis e Koch (1977), conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Classificação dos valores do índice Kappa para a classificação do uso e ocupação da terra.

Valores de Kappa	Classificação
< 0	Péssima
0,00 – 0,019	Ruim
0,20 – 0,39	Razoável
0,40 – 0,59	Boa
0,60 – 0,79	Ótima
0,80 – 1,0	Excelente

Fonte: Landis e Koch (1977)

2.3 Coleta de amostras

Para a seleção dos pontos de amostragem, nos quais as amostras de água do Rio das Antas e de solo da área de preservação permanente foram coletadas, diversos fatores foram criteriosamente considerados. Entre esses fatores, destacam-se a presença de indústrias, a localização da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE), áreas residenciais, cultivos agrícolas, pastagens, reflorestamentos e a proximidade de fragmentos de floresta nativa em relação ao corpo hídrico, proporcionando uma representação abrangente das diferentes atividades e influências potenciais na qualidade da água e na caracterização do solo na região de estudo.

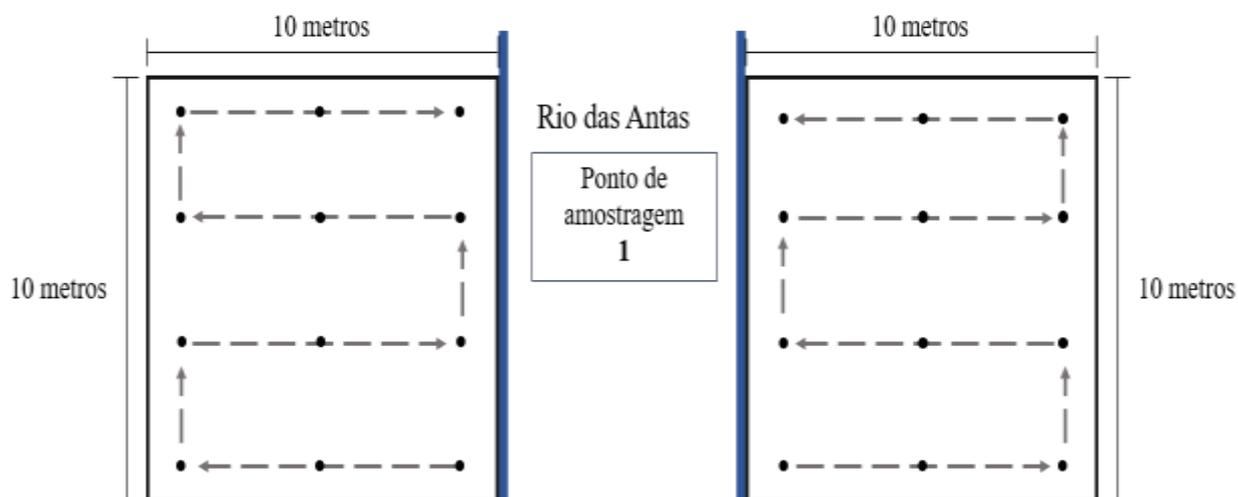
Foram selecionados 14 pontos de amostragem, começando na nascente do Rio das Antas (ponto 1) e estendendo-se até a foz (ponto 14). A escolha desse número específico de pontos levou em consideração a distribuição dos usos da terra previamente mencionados, bem como a consideração de que pontos muito próximos entre si não apresentariam variações significativas na caracterização da água coletada, devido à dinâmica natural do rio. Além disso, a adoção de

um maior número de amostragem tornaria inviável as coletas das amostras de águas todas no mesmo dia. Essa abordagem visou assegurar uma representação adequada das condições ao longo do curso do rio, considerando que diferentes fatores como o lançamento de esgotos industriais e domésticos sem tratamento, depósito de resíduos sólidos e as demais atividades antrópicas, que podem influenciar na qualidade da água no decorrer do mesmo.

2.4 Coleta das unidades amostrais de solo da APP do Rio das Antas

Para realizar a caracterização da fertilidade do solo na área de preservação permanente do Rio das Antas, foram coletadas unidades amostrais na primeira camada de solo (0-20 cm de profundidade) em ambos os lados do rio em cada um dos 14 pontos de amostragem adotados.

Para a obtenção das amostras de solo de cada ponto, foi estabelecida uma área de coleta de 10 metros quadrados em ambos os lados do rio. Dentro dessas áreas, as amostras de solo foram coletadas seguindo um padrão "zigue-zague" como representado na Figura 2.



Fonte: O Autor, 2024.

Figura 2. Esquema utilizado para realização das coletas de amostras de solo.

As amostras individuais obtidas por meio desse método foram posteriormente combinadas para formar uma única amostra composta, tanto do lado direito quanto do lado esquerdo do rio, para a profundidade estabelecida, seguindo as indicações de Arruda *et. al*, (2014). A demarcação da área de coleta foi realizada com a utilização de uma fita métrica, enquanto as amostras foram coletadas utilizando um trado. Após a coleta, a homogeneização e a criação da amostra composta, esta foi armazenada em sacos plásticos previamente etiquetados para fins de identificação e registro.

Inicialmente, procedeu-se à secagem das amostras por meio de secagem em estufa a uma temperatura de 60°C e após a completa desidratação, as amostras foram submetidas à trituração, resultando em uma granulometria reduzida, visando obter uma amostra mais uniforme em termos de sua composição. Posteriormente a preparação das amostras, foram realizadas as análises dispostas na Tabela 1, seguindo as indicações metodológicas disponíveis no Manual de Análises químicas de solos, plantas e fertilizantes da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2009). Os parâmetros avaliados para caracterização do solo da APP do Rio das Antas foram: pH CaCl₂; Ca²⁺; Alumínio (Al³⁺), Matéria orgânica (MO); Fósforo (P); Potássio (K⁺); Capacidade de troca catiônica (CTC); Soma de bases (SB); Saturação das bases (V%).

Após a realização da caracterização das amostras de solo e a obtenção dos dados, calculou-se a média para cada parâmetro em relação a ambos os lados do rio, nos seus respectivos pontos amostrais, resultando em um valor único.

2.5 Coleta das amostras de água do Rio das Antas e cálculo do índice de qualidade da água

Com o propósito de garantir que os resultados da caracterização das amostras de água do rio refletissem de maneira representativa suas condições, especialmente em situações de poluição pontual e esporádica, e para obter uma maior confiabilidade dos dados coletados, foram conduzidas três repetições das coletas em cada um dos 14 pontos, em diferentes dias.

Para realizar essas coletas, foi adotada a condição de que não deveria ter ocorrido precipitação na área da Bacia Hidrográfica do Rio das Antas por, pelo menos, sete dias

consecutivos, a fim de evitar interferências na qualidade da água devido à chuva. Segundo Nilsson e Renöfält, (2008), a alteração na taxa de fluxo decorrente da precipitação tem um impacto direto na qualidade da água, notadamente na diluição de determinados poluentes, os quais podem adquirir toxicidade em concentrações específicas, podendo, adicionalmente, induzir à eutrofização e à acidificação dos corpos hídricos. Essa abordagem visou minimizar a variabilidade e aumentar a robustez dos resultados obtidos nas análises das amostras de água.

Foram efetuadas coletas de amostras em três seções distintas da superfície do rio, sendo em ambas as laterais e na região central, seguidas pela combinação das amostras coletadas em uma composta. As coletas foram conduzidas utilizando frascos de 300 ml previamente esterilizados por autoclave, a fim de prevenir qualquer potencial contaminação do material coletado.

Para caracterização da água, adotou-se os parâmetros apresentados no Quadro 1 os quais são necessários para realização do índice de qualidade da água (IQA). As análises foram realizadas no período máximo de 24 horas após a execução da coleta, por meio das metodologias indicadas no *Standart Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2017).

Quadro 1. Parâmetros utilizados para a caracterização da água do Rio das Antas.

Parâmetros	Unidades de medida
Demanda bioquímica de oxigênio (DBO)	(mg/L)
Oxigênio dissolvido (OD)	(%)
Nitrogênio total (N)	(mg/L)
Fósforo total (P)	(mg/L)
Turbidez (Turb.)	(NTU)
Resíduos totais (RT)	(mg/ton)
<i>Escherichia coli</i> (<i>E. coli</i>)	(CF/100ml)
Temperatura (T)	(Δ T)
pH	-

Fonte: O Autor, 2024.

Após a caracterização das amostras, foi realizado o cálculo do índice de qualidade da água por meio da metodologia disponível pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) em conjunto com a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) (Cetesb, 2019). O IQA, concebido pela *National Sanitation Foundation Institution* (NSF), é uma ferramenta fundamental para a avaliação abrangente da qualidade da água, realiza uma

transformação de múltiplas variáveis relacionadas à água em um único valor numérico que viabiliza a categorização da qualidade da água.

O cálculo do Índice de Qualidade da Água foi realizado de acordo com a abordagem da combinação multiplicativa com pesos exponenciais dos subíndices derivados das curvas de qualidade da água, conforme adotado pela Cetesb no ano de 2006. O cálculo do IQA seguiu a formulação apresentada na Equação 2, conforme proposto por Landwehr e Deininger (1976, *apud* em BRASIL, 2001).

$$IQA = \prod_{i=1}^n q_i^{w_i}$$

(Equação 2)

Em que:

IQA: índice de qualidade da água (limites de 0 a 100);

qi: qualidade do parâmetro i, obtido pela curva média específica de qualidade;

wi: peso atribuído ao parâmetro em função de sua importância na qualidade entre 0 e 1.

Após a avaliação dos resultados obtidos no índice de qualidade da água, torna-se possível categorizar as amostras colhidas do Rio das Antas em diferentes classes, que incluem: péssima, ruim, razoável, boa e ótima.

2.6 Análise estatística dos dados

O experimento seguiu um delineamento inteiramente casualizado com 14 pontos de amostragem e três réplicas por ponto amostral.

Para avaliar o efeito da fertilidade do solo e da paisagem na qualidade da água em função do IQA e seus parâmetros foram efetuadas duas abordagens. A primeira consistiu em determinar quais variáveis influenciam significativamente no IQA por meio de Mmodelos

Lineares Generalizados mistos (GLM), uma vez que esta técnica aceita colinearidade entre as variáveis preditoras, outros tipos de distribuições dos resíduos que não seja a gaussiana, e permite que variáveis contínuas e categóricas sejam inseridas no modelo. A segunda abordagem tratou os dados em uma análise de correspondência canônica, onde a matriz de todos os parâmetros de qualidade da água foi condicionada as variáveis de solo e da paisagem concomitantemente. A significância das correlações, para o primeiro e segundo eixos, e das variáveis individualmente com os eixos, foi avaliada pelo teste de Monte Carlo, com 999 permutações. Todas as análises foram efetuadas com auxílio do RStudio.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

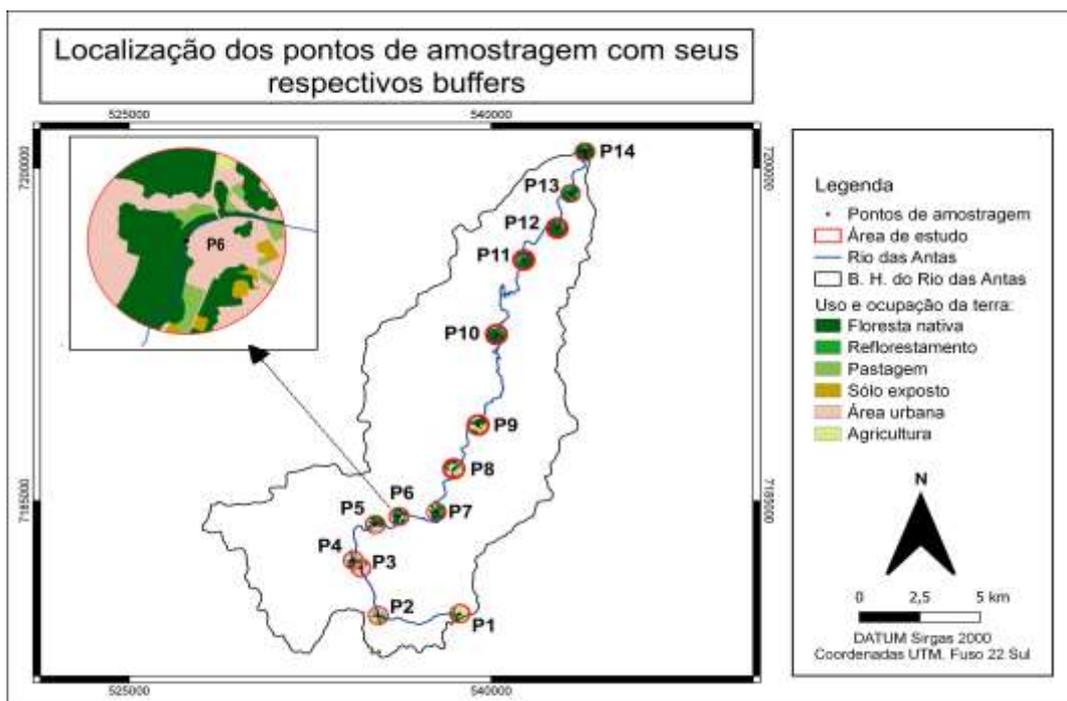
3.1 Avaliação e descrição do uso e ocupação da terra na bacia hidrográfica do Rio das Antas

As localizações dos pontos de amostragem adotados com suas respectivas coordenadas geográficas estão dispostas na Tabela 2.

Tabela 2. Distribuição geográfica dos pontos de amostragem.

Ponto de amostragem	Coordenadas UTM, zona 22 Sul
Ponto 1	538437.61 m E / 7179953.67 m S
Ponto 2	535314.69 m E / 7179830.50 m S
Ponto 3	534607.97 m E / 7181969.79 m S
Ponto 4	534294.27 m E / 7182309.39 m S
Ponto 5	535139.31 m E / 7183922.70 m S
Ponto 6	536176.10 m E / 7184283.03 m S
Ponto 7	537726.85 m E / 7184499.74 m S
Ponto 8	538477.24 m E / 7186469.70 m S
Ponto 9	539470.35 m E / 7188415.84 m S
Ponto 10	540180.94 m E / 7192487.99 m S
Ponto 11	541330.47 m E / 7195862.11 m S
Ponto 12	542705.97 m E / 7197293.60 m S
Ponto 13	543300.82 m E / 7198850.53 m S
Ponto 14	543924.88 m E / 7200753.31 m S

Por meio da elaboração de um mapa que representa o uso e ocupação da terra na Bacia Hidrográfica do Rio das Antas, seguida pela demarcação dos *buffers* em torno dos pontos de coleta e seu recorte, foi produzida a Figura 3.



Fonte: O Autor, 2024.

Figura 3. Localização dos pontos de amostragem da água do Rio das Antas e seus respectivos *buffers*.

Após a condução dos cálculos das superfícies correspondentes a cada categoria de uso da terra nos buffers em torno dos locais de amostragem analisados, os resultados obtidos na Tabela 3 foram adquiridos em função das suas porcentagens de área.

Tabela 3. Porcentagens dos usos avaliados nos pontos de amostragem.

Pontos	Porcentagem dos usos e ocupação da terra (%)					Área urbanizada
	Floresta nativa	Reflorestamento	Pastagem	Solo exposto	Agricultura	
Ponto 1	20,02	0,17	11,18	0,65	66,14	1,82
Ponto 2	6,59	0	9,39	3,11	0	80,90
Ponto 3	15,81	0	4,51	2,25	0	77,42
Ponto 4	24,57	0	4,84	3,82	0	66,74
Ponto 5	32,93	0	10,38	1,03	0	55,63
Ponto 6	46,83	0	6,44	3,19	0,66	42,85
Ponto 7	52,14	5,07	8,08	13,65	9,25	5,64
Ponto 8	42,22	2,03	11,13	0,32	39,63	2,60
Ponto 9	71,50	0	1,27	0,96	23,67	2,57
Ponto 10	76,84	13,75	5,66	0	3,73	0
Ponto 11	80,12	19,87	0	0	0	0
Ponto 12	82,28	3,67	14,03	0	0	0
Ponto 13	62,87	18,08	19,04	0	0	0
Ponto 14	82,99	10,43	6,56	0	0	0

Fonte: O Autor, 2024.

Através da análise dos dados apresentados, torna-se evidente a predominância de uso do solo urbanizado em uma proporção substancial nos pontos de amostragem 2, 3, 4, 5 e 6. Este tipo de uso da terra compreende mais de 40% da área total examinada, com destaque para o ponto de amostragem 2, onde aproximadamente 80,90% de seu território é dedicado a essa categoria específica. Importante ressaltar que esses pontos de coleta estão localizados dentro das zonas urbanas do município de Irati. Como resultado, há uma notável ausência de remanescentes florestais nessa região. Esta constatação indica um acentuado avanço da urbanização, evidenciando um impacto antropogênico exponencial. Adicionalmente, observa-se uma escassez de áreas destinadas ao reflorestamento e solos providos de cobertura vegetal, sugerindo uma predominância de usos do solo associados à expansão urbana.

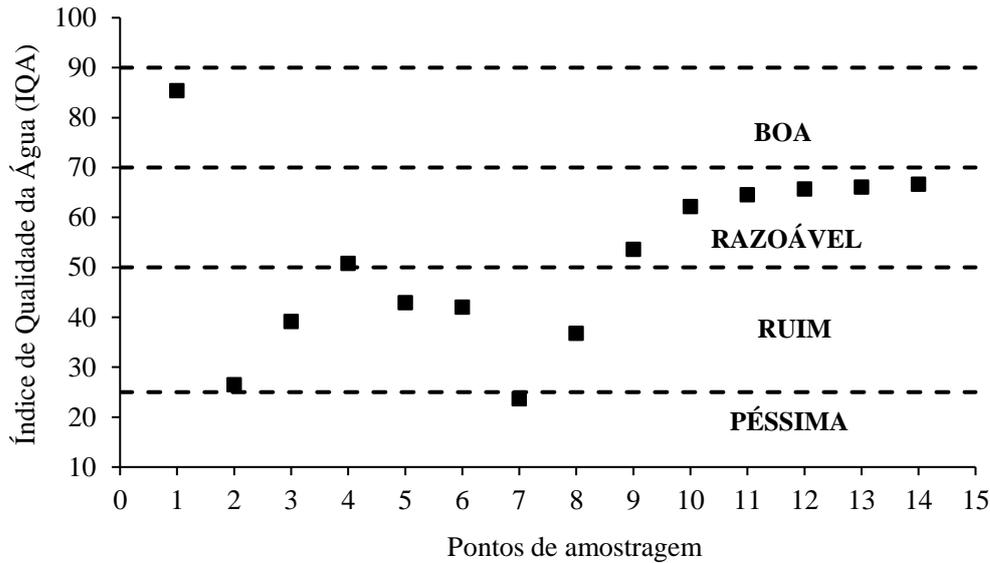
Ao analisar os pontos 1 (nascente), 8 e 9, é evidenciada uma prevalência de atividades agrícolas nestas áreas. Essa observação pode ser atribuída às respectivas localizações destes pontos, que se encontram nas regiões periféricas do núcleo urbano. Cabe ressaltar que o ponto 7 apresenta uma diversidade de usos do solo, embora seu foco principal esteja na presença de uma estação de tratamento de esgotos. Esta ETE é responsável pela condução de tratamento dos efluentes, cujo resultado é lançado no rio sob avaliação.

Por outro lado, em contraste com os demais pontos de amostragem, os pontos 10, 11, 12, 13 e 14 (na área de foz) situam-se em uma região de preservação intensiva, dentro da Floresta Nacional (Flona) de Irati. Essa característica explica as elevadas porcentagens de cobertura florestal nativa observadas nessas localidades. A Flona de Irati é um dos principais remanescentes florestais da região, destacando-se pela presença de araucárias. Além disso, está geograficamente próxima da Reserva Biológica das Araucárias e da Estação Ecológica de Fernandes Pinheiro, conforme destacado por Grise *et al.* (2009) e documentado pelo governo brasileiro (BRASIL, 2000).

Cabe destacar que a validação da classificação foi realizada e demonstrou uma correspondência apropriada com a área de estudo, obtendo um Índice Kappa de 0,8185. Este valor é considerado como indicativo de uma classificação de uso e ocupação da terra de nível excelente, conforme definido por Lands e Koch (1997).

3.2 Avaliação da qualidade da água do Rio das Antas

Por meio dos resultados provenientes da caracterização das amostras de água coletadas no Rio das Antas, seguida da aplicação do Índice de Qualidade da Água a cada um dos locais examinados, foi obtida a classificação exibida na Figura 4.



Fonte: O Autor, 2024.

Figura 4. Atribuição do índice de qualidade da água para os pontos avaliados.

É possível identificar, por meio de critérios de classificação, que os locais com índices de urbanização mais elevados, os pontos 2, 3, 4, 5 e 6 e 7, exibem os menores Índices de Qualidade da Água (RUIM/PÉSSIMO) em comparação aos demais pontos (Figura 3). Esta observação ressalta de maneira conclusiva que a poluição decorrente de atividades urbanas exerce um impacto direto e substancial na deterioração da qualidade da água em tais áreas, uma constatação respaldada por pesquisas conduzidas por Crisigiovanni *et al.* (2020) na mesma bacia hidrográfica em estudo, assim como nos estudos realizados por Carvalho *et al.* (2015) na bacia do Rio do Campo (Campo Mourão-PR) e por Barrilli *et al.* (2021) na bacia do Rio Monjolinho, no estado de São Paulo. Diversos estudos apontam que, em comparação com regiões de caráter natural, as concentrações de nutrientes (nitrogênio e fósforo), carga orgânica (DBO) e a presença de microrganismos (notadamente coliformes termotolerantes e *E.coli*)

tendem a apresentar elevações significativas nos corpos hídricos localizados em ambientes tanto urbanos quanto rurais, como observado por Hepp e Santos (2009), Cunha *et al.* (2016) e Figueiredo *et al.* (2019).

Além disso, é importante observar que os impactos da poluição urbana não se restringem apenas aos pontos urbanizados, uma vez que essa poluição pode afetar também os locais situados a jusante, como os pontos 7 e 8, devido ao transporte de poluentes e substâncias contaminantes ao longo do curso d'água. Os baixos valores do índice obtidos nos pontos em questão estão intrinsecamente associados à considerável presença de despejos de origem doméstica nas amostras coletadas do Rio das Antas. Isso culmina em concentrações elevadas de nitrogênio, fósforo, matéria orgânica, sólidos e de microrganismos no corpo d'água. Além disso, a presença acentuada desses poluentes resulta em uma redução significativa nos níveis de oxigênio dissolvido na água.

Por outro lado, é perceptível o aumento do índice de qualidade da água à medida que avançamos nos pontos de avaliação além das áreas urbanizadas. Isso se deve ao fato de que os pontos 10, 11, 12, 13 e 14 se encontram dentro dos limites da Floresta Nacional de Irati, áreas caracterizadas pela ausência de influências humanas diretas. Nesse contexto, torna-se evidente a capacidade de autodepuração por meio do acréscimo do IQA do corpo d'água avaliado, uma vez que o ambiente natural e preservado da FLONA permite a recuperação e a melhora na qualidade da água, à medida que os poluentes são diluídos e removidos de forma natural. Essa correlação pode ser estabelecida em razão de um princípio mencionado por Von Sperling (1983). Segundo o autor, para que ocorra a autodepuração de um corpo hídrico, é essencial a avaliação de pelo menos dois parâmetros-chave: o oxigênio dissolvido, que serve como indicador dos processos de estabilização da matéria orgânica, e a presença de coliformes. Embora o índice de qualidade da água não leve em consideração a concentração de coliformes, a avaliação por meio da presença de *Escherichia Coli* no índice representa a detecção dos demais patógenos. Isso ocorre porque a presença desses microrganismos indica a presença dos demais devido à sua elevada sensibilidade como indicadores de contaminação fecal (BRASIL, 2021).

No contexto do processo de autodepuração, conforme descrito por Eiger (2002), uma série de mecanismos físicos, biológicos e químicos entram em ação para modificar e diminuir as concentrações de poluentes que são introduzidos em um corpo de água, principalmente

provenientes de fontes como o esgoto doméstico. É importante notar que, embora essas substâncias possam passar por reações no ambiente aquático, que às vezes resultam em um aumento temporário, os mencionados mecanismos desempenham um papel fundamental na atenuação dos impactos poluentes no ecossistema aquático. Resultados semelhantes foram obtidos por Kuhlmann *et al.* (2014), onde ao investigar os impactos das atividades humanas nos rios situados em zonas de conservação da Mata Atlântica, constataram que o gradiente observado no rio Paraibuna indica uma restauração, embora parcial, da qualidade da água. Essa melhora se manifesta no trecho do rio situado na Unidade de Conservação Cunha, a qual anteriormente sofre influência direta da ocupação humana. Da mesma maneira, Godoy *et al.*, (2021), ao realizarem uma avaliação da qualidade da água na Bacia do Rio Piriqui, foi constatada uma melhora nos resultados dessa qualidade em função da preservação de áreas a jusante.

3.3 Avaliação da fertilidade do solo na APP do Rio das Antas

A caracterização da fertilidade do solo da APP do Rio das Antas está apresentada na Tabela 4 para os parâmetros estudados. Os valores apresentados em cada um dos pontos amostrados são referentes a média entre ambos os lados do rio.

Tabela 4. Caracterização da fertilidade do solo da APP do Rio das Antas nos pontos de amostragem avaliados.

Pontos	pHCaCl ₂	MO	P	K ⁺	Ca ²⁺	CTC	V%	SB	Al ³⁺
P. 1	4,2±0,2	47,6±2,8	117,5±2,0	0,6±0,0	8,8±0,1	19,8±0,5	62,3±1,6	12,4±0,0	0,8±0,0
P. 2	4,3±0,1	15,2±0,4	29,9±15,2	0,3±0,0	4,1±0,1	18,2±1,2	37,6±5,0	6,8±0,4	2,8±0,1
P. 3	3,9±0,0	8,3±7,2	39,3±7,3	0,3±0,0	2,8±1,6	18,8±1,3	26,1±7,1	4,9±1,6	3,9±0,1
P. 4	4,7±0,0	44,6±3,3	221,1±21	0,7±0,0	9,2±0,3	18,5±0,4	69,9±0,9	12,9±0,4	0,5±0,0
P. 5	4,0±0,0	14,6±0,7	37,2±2,4	0,3±0,0	3,3±0,8	10,5±0,2	49,8±8,0	5,5±0,9	3,0±0,2
P. 6	4,0±0,1	9,1±7,1	31,2±4,5	0,3±0,0	3,7±0,1	15,7±2,4	38,7±5,6	6,0±0,0	3,1±0,5
P. 7	3,8±0,0	4,4±4,2	51,6±51,4	0,4±0,0	3,4±1,2	21,4±2,0	31,1±3,5	6,7±1,3	4,9±0,1
P. 8	4,0±0,0	25,8±1,4	164,9±37,7	0,58±0,0	6,26±0,6	19,0±0,8	50,76±1,1	9,66±0,6	0,9±0,1
P. 9	4,6±0,1	35,4±0,9	132,82±4,7	0,49±0,0	7,77±0,2	17,33±0,4	66,50±0,4	11,52±0,3	0,4±0,0
P. 10	4,3±0,0	35,8±3,3	148,67±2,7	0,53±0,0	8,39±0,5	20,0±0,9	59,68±5,5	11,91±0,5	0,8±0,0
P. 11	4,7±0,0	33,4±0,9	115,1±0,5	0,51±0,0	8,95±1,3	18,3±2,0	67,84±0,4	12,42±1,4	0,6±0,0
P. 12	4,2±0,0	32,7±0,0	162,9±50,5	0,45±0,1	8,08±0,1	18,5±0,4	61,51±1,8	11,41±0,1	0,8±0,0
P. 13	4,4±0,0	35,4±2,8	183,6±13,9	0,56±0,0	8,84±0,1	19,1±0,9	65,40±0,6	12,50±0,5	0,6±0,0
P. 14	4,5±0,2	35,1±2,3	121,8±22,3	0,56±0,0	8,68±0,4	18,7±0,2	65,27±1,4	12,21±0,4	0,7±0,0
Unidades	-	g/dm ³	mg/dm ³	cmol/dm ³	cmol/dm ³	cmol/dm ³	%	cmol/dm ³	cmol/dm ³

Fonte: O Autor, 2024.

Ao analisar os valores de pH reduzidos, pode-se inferir que esses resultados são atribuíveis a uma combinação de fatores naturais e antrópicos. Essa tendência foi observada tanto em áreas predominantemente urbanas quanto em regiões que mantêm suas áreas preservadas. De maneira natural, os solos brasileiros possuem um alto grau de intemperizados e são comumente ácidos, além disso, a acidez do solo pode ser originada, da decomposição do próprio material orgânico proveniente da floresta como folhas, cascas e galhos, originando ácidos orgânicos no meio, relacionada a própria ciclagem dos nutrientes.

Sob influência antropogênica, a remoção da cobertura vegetal promove a lixiviação de nutrientes alcalinos existentes no ambiente, resultando na redução do pH e, conseqüentemente, na diminuição da disponibilidade de alguns nutrientes para a vegetação (pontos 2, 3, 4, 5, 6 e 7). Essa afirmação pode ser corroborada ao analisar os teores baixos de Ca, V% e a soma das bases nesses pontos que estão diretamente relacionados com os reduzidos valores de CTC.

Quando referido aos teores de alumínio nas amostras, características geológicas locais e a ação do intemperismo regional podem promover concentrações mais elevadas deste elemento de maneira geral. Nas áreas mais vegetadas o alumínio pode estar complexado na matéria orgânica do solo, o que acarreta a redução dos valores de alumínio trocável. Em contrapartida, maiores concentrações são obtidas em regiões urbanizadas devido aos menor presença de matéria orgânica nesses locais, todavia, este metal é encontrado mais facilmente e em maiores teores devido a sua forma solúvel.

A saturação de bases do solo, expressa em termos de Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ , mantém uma relação direta com a fertilidade do solo, que se traduz na disponibilidade de nutrientes para as plantas. De acordo com as diretrizes da Embrapa (2009), solos com valores de saturação de bases superiores a 50% são classificados como eutróficos, caracterizando-se por uma boa fertilidade. Em contrapartida, solos com valores de V% inferiores a 50% são classificados como distróficos, indicando uma fertilidade reduzida. Essa proposição mantém uma relação direta com as descobertas do presente estudo, no qual se observa que as regiões mais urbanizadas apresentam valores de saturação de bases inferiores a 50% (pontos 2, 3, 5, 6 e 7), enquanto nas regiões com maior preservação de florestas, os valores de V% superam esse limiar (pontos 1, 4, 8, 9, 10, 11, 12, 13 e 14).

Esse fenômeno é igualmente evidente quando se analisam as concentrações de matéria orgânica e fósforo nas amostras. A vegetação demonstra a capacidade de reter os mesmos na camada superficial do solo, onde esses compostos se concentram, evitando, assim, sua perda devido ao escoamento superficial causada pelas chuvas e aos processos erosivos. Segundo Vanzela *et. al.*, (2010), a intensa e não planejada exploração dos recursos naturais, em conjunto com as características edafoclimáticas, induz a uma maior vulnerabilidade à erosão do solo. Outro fator responsável por altos teores de material orgânico e fósforo nos solos, é devido a ciclagem dos nutrientes oriundos da própria vegetação, principalmente pelo material vegetal depositado (cascas, folhas e frutos) e posteriori decomposição.

Os valores mais elevados observados nas áreas de preservação destes parâmetros podem, adicionalmente, estar associados a um maior tempo de detenção hidráulica durante eventos de enchentes e inundações nas áreas de várzea. Isso ocorre em virtude do fato de que os rios que possuem seções urbanas frequentemente recebem contribuições de esgotos domésticos, o que incrementa as concentrações de material orgânico e nutrientes nesses corpos

d'água. Estes componentes podem ser retidos e mantidos nas regiões alagadiças mais facilmente devido a presença da vegetação (ACQUA *et al.*, 2013).

Essas áreas são reconhecidas como sendo depósitos aluviais ou tecnogênicos, que podem ser definidos como formas geomorfológicas ou depósitos sedimentares resultantes diretamente da atividade humana. Essa definição engloba não apenas os depósitos construídos artificialmente, como aterros e estruturas de contenção, mas também os depósitos induzidos pela ação humana, como aqueles decorrentes da erosão do solo provocada por práticas agrícolas, urbanização, mineração, lançamento de efluentes domésticos, acúmulo de resíduos sólidos, entre outras atividades (SUERTEGARAY *et al.*, 2008). No entanto, essa influência negativa das atividades humanas, pode resultar na acumulação desses depósitos tecnogênicos nessas áreas de preservação, devido às elevadas concentrações deste nutriente nesses materiais. Portanto, a gestão adequada dessas áreas próximas aos corpos hídricos, as quais são caracterizadas como depósitos tecnogênicos, é essencial para proteger a saúde dos ecossistemas aquáticos e garantir a qualidade da água, uma vez que esse nutriente pode ser liberado para o solo e a água durante eventos de chuva intensa ou inundações.

Assim, destaca-se de maneira evidente a significativa influência do uso e ocupação da terra na fertilidade do solo, uma relação que se estabelece primordialmente em decorrência das distinções entre áreas de preservação ambiental e regiões sujeitas a acentuada influência antrópica. Tal relação manifesta-se mediante os efeitos das práticas humanas na composição e condições do solo, notando-se uma marcada diferença entre a manutenção das características naturais e a degradação resultante de atividades humanas intensivas.

3.4 Avaliação entre relação uso e ocupação da terra e fertilidade do solo na qualidade da água

Os dados deste estudo, que analisaram as diferentes classes de uso e ocupação da terra juntamente com os parâmetros pedológicos relacionados à fertilidade do solo e a qualidade das águas (conforme demonstrado na Figura 4), tem como resultado que os teores de fósforo, matéria orgânica, pH em CaCl₂ e a concentração de cálcio, desempenham um papel significativo na influência sobre as características das águas dos rios. Essa influência é

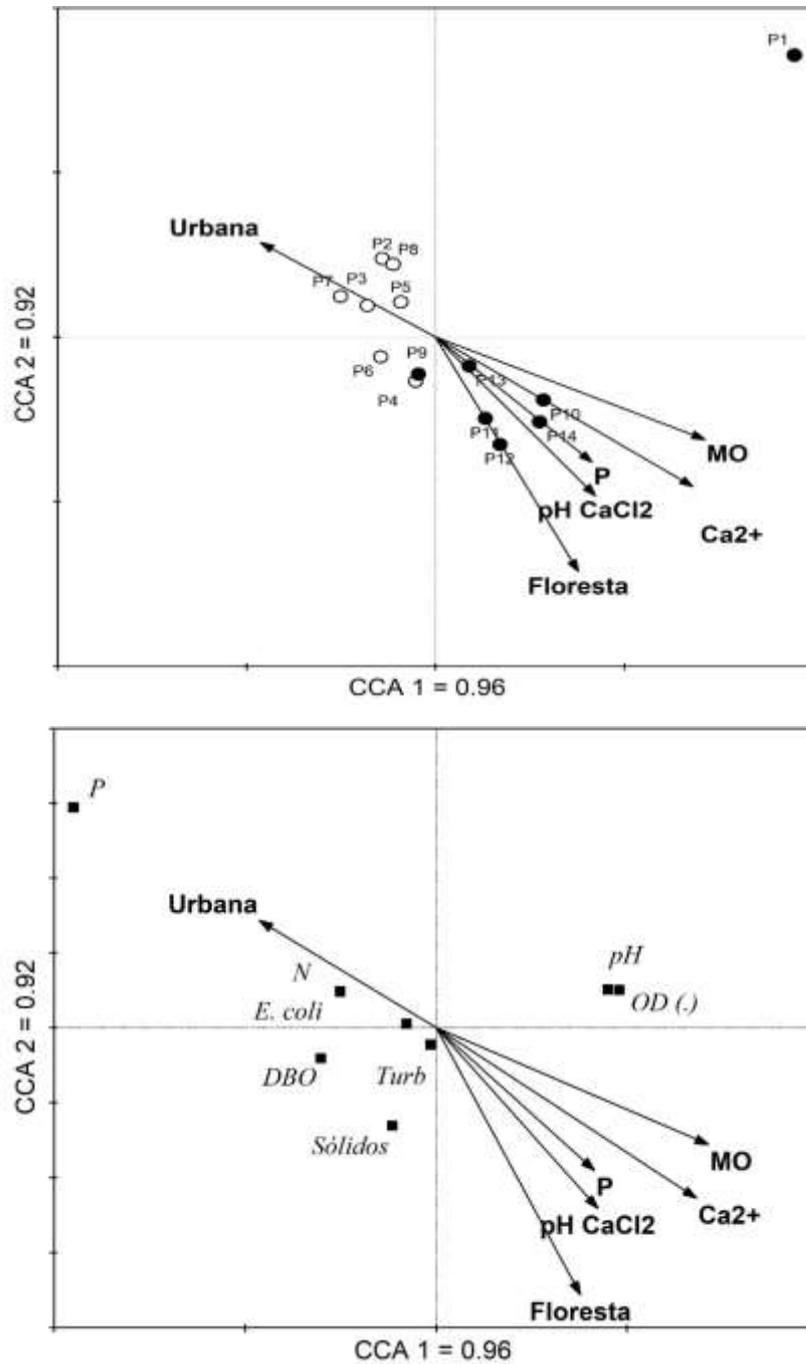
particularmente notável no que se refere a parâmetros como a contagem de *E. coli*, turbidez, concentração de sólidos totais e teor de nitrogênio, que têm uma correlação positiva com áreas urbanizadas. Isso pode ser explicado decorrente da ausência de vegetação, combinado ao transporte e carreamento da primeira camada do solo devido ao escoamento superficial somado as variáveis altimétricas em relação ao leito do rio, todavia, esse material contém em sua composição material orgânico, nutrientes e grande gama de sólidos.

Embora as concentrações de *E. coli* não estejam diretamente correlacionadas com a fertilidade do solo, elas apresentam uma relação intrínseca com os padrões de uso da terra, especialmente no contexto de áreas urbanas. A urbanização e a influência das atividades antrópicas, notadamente o descarte de esgotos domésticos *in natura*, resultam em concentrações acentuadas de microrganismos patogênicos, tais como *E. coli*. Esse padrão também se aplica à avaliação das concentrações de nutrientes como nitrogênio e fósforo nas águas, indicando a forte conexão entre as práticas humanas pela elevada presença destes parâmetros nos esgotos, a poluição da água e a presença desses contaminantes.

Em contrapartida, observou-se uma relação negativa em relação ao pH da água e ao nível de oxigênio dissolvido. Essas conclusões apontam para a forte interligação entre o uso da terra, as características do solo e a qualidade dos recursos hídricos, enfatizando a importância de abordagens integradas na gestão e preservação dos ecossistemas aquáticos. Considerando que o teor de oxigênio dissolvido na água dos rios mantém uma relação inversamente proporcional com a presença de material orgânico, uma vez que este é consumido pelas bactérias aeróbias no decurso dos processos de digestão quando esses compostos estão presentes. Da mesma forma, a partir dos dados obtidos, os valores de pH das águas amostradas não sofreram alteração significativa devido a preservação dessas áreas e não contaminação do corpo hídrico, pois, possivelmente, os excessos de carbonos e outros ácidos orgânicos advindo da decomposição materiais da própria natureza, são capazes de dar um caráter ácido para o meio aquático.

Portanto, ressalta-se que as florestas ripárias, junto com fósforo, matéria orgânica, pH e cálcio, correlacionam negativamente com os parâmetros de qualidade da água supracitados ($R = -0,92$). Em compensação, as áreas urbanas correlacionaram positivamente ($R = 0,96$), nesse sentido pode-se afirmar que as florestas servem como filtros ambientais e prestam importante serviço ecossistêmico na qualidade da água dos rios, além dos parâmetros de solo, pouco

referenciados na literatura na presente abordagem. A representação dos dados está disposta na Figura 5.



Fonte: O Autor, 2024.

**Círculos vazados representam os pontos urbanizados e círculos preenchidos representam pontos com predominância de vegetação.*

Figura 5. Análise de correspondência canônica entre parâmetros de qualidade da água e elementos da paisagem e variáveis de fertilidade do solo no Rio das Antas em Irati-PR.

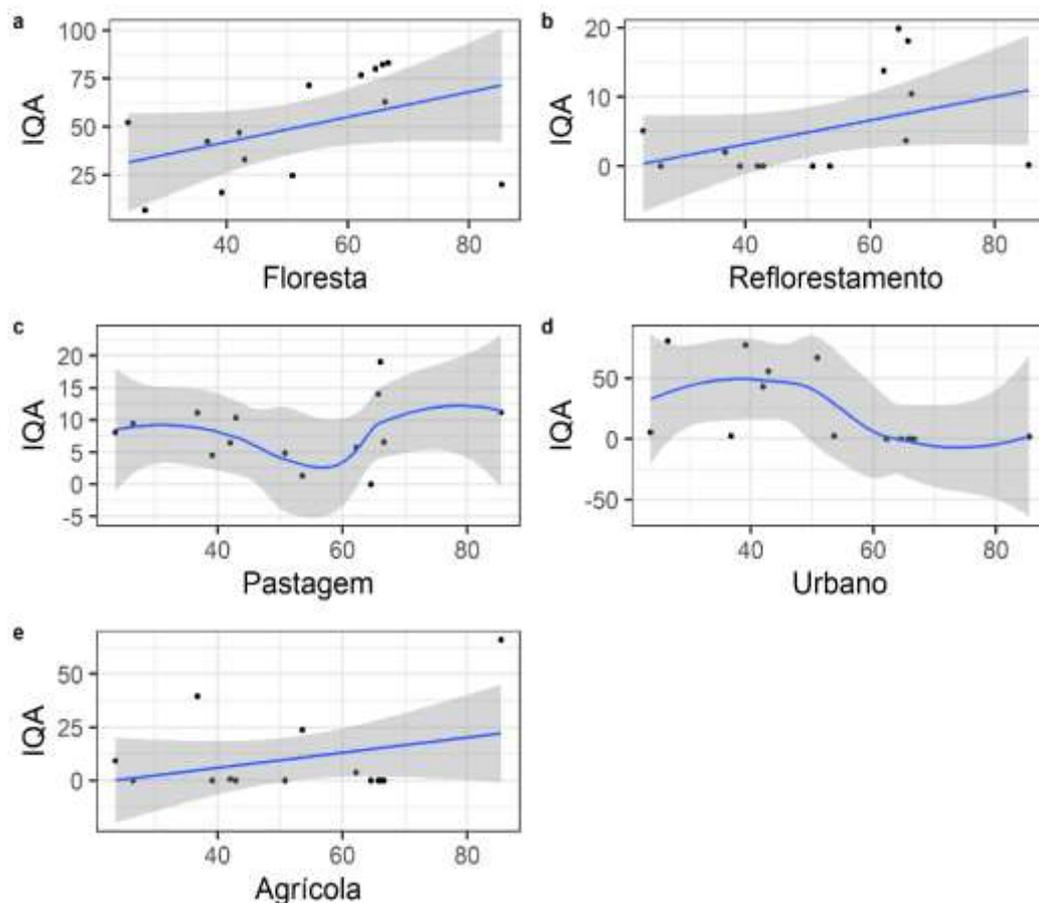
Em uma avaliação da qualidade da água em função do IQA o modelo linear generalizado misto ($R^2_{\text{ajustado}} = 0.98$; $F = 19.44$; $p < 0.01$) apontou, conforme observado na tabela 5, preditoras similares as observadas para os parâmetros na CCA, com diferenças importantes no que se referem a classe de uso e ocupação, uma vez que Reflorestamento (correlação +) ; Floresta (correlação +); Urbanização (correlação -); Agricultura (correlação -) e Pastagem (correlação -) interferiram significativamente no IQA, as variáveis de solo ficaram restritas ao conteúdo de material orgânico e alumínio.

Tabela 5. Resultados da construção de modelos, distribuição normal utilizando da função log.

Parâmetros	F	p
<i>Intercept</i>	7,92752	0,004869
<i>pH CaCl2</i>	0,40449	0,524780
<i>Capacidade de troca catiônica</i>	1,30318	0,253634
<i>Fósforo</i>	1,73232	0,188115
<i>Matéria orgânica</i>	34,25191	0,000000
<i>Alumínio</i>	8,33543	0,003888
<i>Floresta</i>	9,52913	0,002022
<i>Reflorestamento</i>	8,84258	0,002943
<i>Pastagem</i>	9,74013	0,001803
<i>Solo</i>	2,64182	0,104084
<i>Área urbana</i>	8,67346	0,003229
<i>Agrícola</i>	9,06553	0,002605

Fonte: O Autor, 2024.

As relações individuais do IQA supracitadas podem ser observadas nas Figuras 6 e 7.



Fonte: O Autor, 2024.

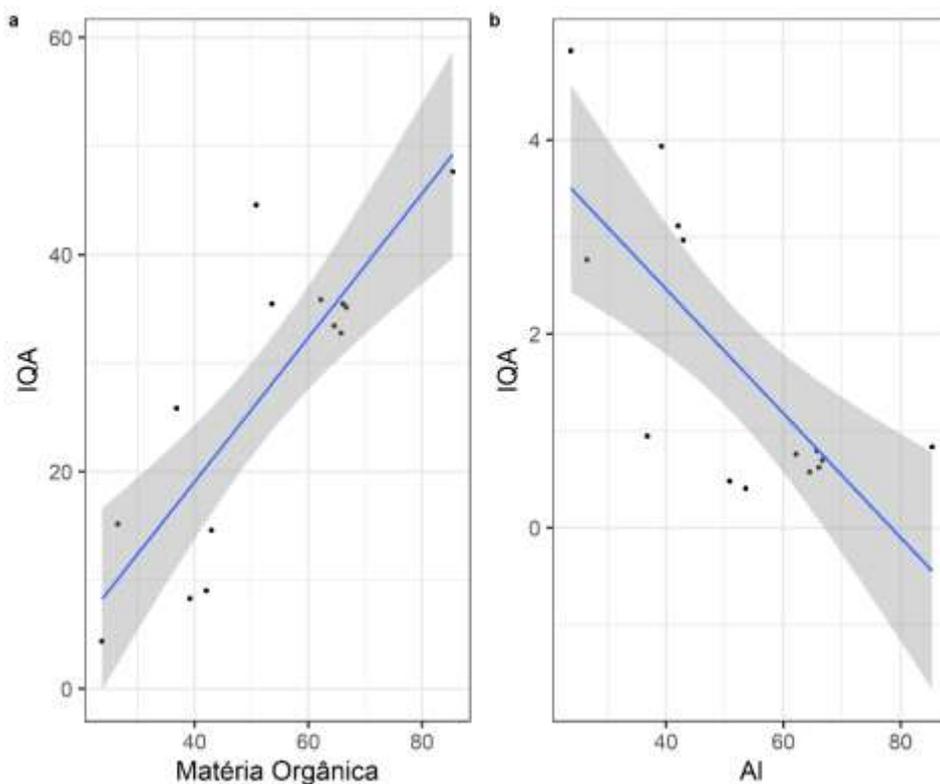
Figura 6. Variáveis de uso e ocupação da terra que influenciaram no índice de qualidade da água dos pontos de amostragem.

Por meio da Figura 5, pode-se concluir que há uma relação direta e positiva entre as classes de usos da terra de Florestas Nativas e Reflorestamentos com valores mais elevados de IQA, ou seja, com as melhores qualidades das águas. Essa associação evidencia a influência significativa exercida por essas áreas na promoção da melhoria e preservação da qualidade das águas dos corpos hídricos, facilitando os processos de autodepuração e mitigando os efeitos adversos da atividade humana resultantes da expansão nessas zonas. Essas áreas desempenham um papel crucial na capacidade dos ecossistemas aquáticos de atenuar os impactos da urbanização e da ocupação humana sobre os recursos hídricos, contribuindo para a sustentabilidade e a resiliência dos ambientes aquáticos.

Por outro lado, ainda analisando a Figura 5, nota-se que as classes de usos Urbanos, Agrícolas e de Pastagens, são responsáveis por relacionar negativamente com o IQA, ou seja,

decorrente de maiores porcentagens nos seus usos nas áreas avaliadas, obteve-se valores inferiores de IQA. Isso acontece principalmente devido ao avanço antropogênico desordenado nas regiões de várzea, resultando em diversos pontos de lançamentos de esgotos domésticos sem seu devido tratamento, assim como, da supressão da vegetação e depósito de resíduos sólidos nos leitos nos rios. Outro fator preponderante é a agricultura, onde além de ser uma fonte excessiva de nutrientes os quais atingem os corpos hídricos, também favorece para criação de áreas de solos expostos e o carreamento destes materiais até os rios.

A representação das variáveis de fertilidade do solo as quais obtiveram uma maior influência sobre o IQA nos pontos de amostragem está apresentada na Figura 6.



Fonte: O Autor, 2024.

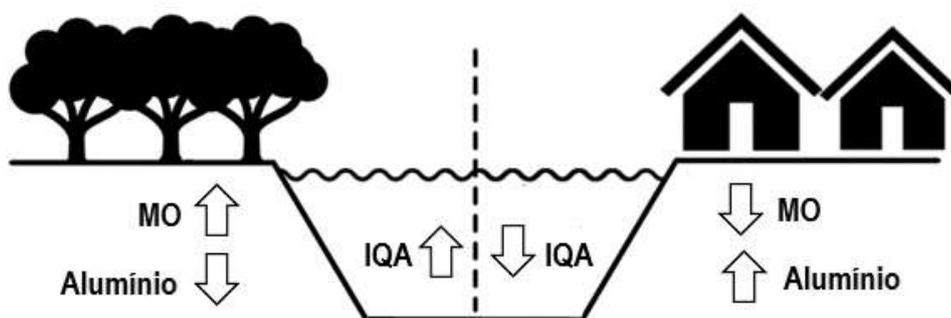
Figura 7. Variáveis de fertilidade do solo que influenciaram no índice de qualidade da água nos pontos amostrados.

Por meio da análise da Figura 7, é possível identificar uma relação clara entre o teor de material orgânico presente no solo e o aumento dos valores do IQA. Essa associação se fundamenta na ideia de que a presença de material orgânico no solo sugere um ambiente preservado em termos de vegetação, o que, por sua vez, resulta em níveis locais de fertilidade mais elevados.

Além disso, é relevante destacar que, na ausência de vegetação ripária nas áreas de preservação permanente, a matéria orgânica presente no solo pode ser mineralizado, transportado e depositado no leito dos rios, contribuindo para a degradação dos parâmetros físicos e químicos da água. Essa ocorrência evidencia a importância das áreas de vegetação ripária como um elemento-chave na manutenção da qualidade da água, ao reduzir a carga de material orgânico e outros poluentes que podem ser carregados para os cursos d'água e frear o avanço antrópico nessas regiões.

Devido à presença do alumínio, observa-se uma relação inversa, visto que maiores valores do IQA são encontrados em pontos com concentrações reduzidas de alumínio no solo. Isso sugere que o Al ocorre predominantemente de maneira natural, em grande parte atribuível a fatores geológicos e pedológicos, e não é agravado substancialmente pela intervenção humana. Ainda que a redução do teor de matéria orgânica libera alumínio presente no solo, diminuindo assim sua complexação pela matéria orgânica.

A representação esquemática da relação os usos e ocupação da terra e os parâmetros de fertilidade do solo juntamente com o IQA está apresentada na Figura 8.



Fonte: O Autor, 2024.

Figura 8. Representação esquemática da relação entre usos da terra, fertilidade do solo e índice de qualidade da água.

4. CONCLUSÕES

As Áreas de Preservação Permanente que possuem sua vegetação preservada agem como filtros biológicos atuando na preservação e recuperação dos corpos hídricos, reduzindo seus índices de poluição e melhorando a qualidade das águas. Em contrapartida, o avanço antrópico nessas áreas é responsável pela deterioração da qualidade dos cursos hídricos.

A presença da vegetação é responsável por manter e assegurar uma maior fertilidade dos solos da APP, principalmente quando relacionado os teores de material orgânico, fósforo, cálcio e o pH em CaCl_2 dos mesmos.

Há uma relação direta entre as áreas que possuem maior porcentagem de vegetação nativa com maiores teores de material orgânico no solo e valores reduzidos de alumínio com maiores índices de qualidade da água. Do mesmo modo, há uma relação direta entre baixos teores de material orgânico nos solos, maiores concentrações de alumínio e baixos índices de qualidade da água em áreas urbanizadas.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVIM, A. T. B.; KATO, V. R. C.; ROSIN, J. R. G. A urgência das águas: intervenções urbanas em áreas de mananciais. **Cad. Metrop.**, v.17, n.33, p. 83-107, 2015.

ACQUA, N. H. D.; SILVA, G. P.; BENITES, V. M.; ASSIS, R. L.; SIMON, G. A. Métodos de amostragem de solos em áreas sob plantio direto no Sudoeste Goiano. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 2, p.117-122, 2013.

APHA, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. **American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environmental Federation**, 23rd. ed. Washington, D.C.: American Public Health Association, 2017.

ARRUDA, M. R.; MOREIRA, A.; PEREIRA, J. C. R. Amostragem e cuidados na coleta de solo para fins de fertilidade. Manaus: **Embrapa Amazônia Ocidental**, 2014. 18p.

BAIHUA, FU, MERRITT, WS, CROKE, BFW, WEBER, T., & JAKEMAN, AJ. A review of catchment-scale water quality and erosion models and a synthesis of future prospects. **Environmental Modelling & Software**, 2019.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, nº 5, seção 1, p. 69, 21 de maio de 2021.

BRASIL. Programa Nacional do Meio Ambiente - PNMA II. Índice e indicadores de qualidade da água: revisão da literatura. Recife: **Ministério do Meio Ambiente**, 2001.

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Apêndice D – Índice de Qualidade de Água. In: MARTINS, M. H. R. B. (coord. geral). Qualidade das Águas Interiores no Estado de São Paulo 2018 (Série Relatório). São Paulo: **CETESB**. 32 p., 2019. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/> Acesso em: 2 nov. 2023.

COSTA, C. W.; DUPAS, F. A.; PONS, N. A. D. Regulamentos de uso do solo e impactos ambientais: avaliação crítica do plano diretor participativo do município de São Carlos, SP. **Geociências**, v. 31, p. 143-157, 2012.

CUNHA, D.G.F.; SABOGAL-PAZ, L.P.; DODDS, W.K. Land use influence on raw surface water quality and treatment costs for drinking supply in São Paulo State (Brazil). **Ecological Engineering**, v. 94, p. 516-524, 2016.

EIGER, S. Introdução à Engenharia Ambiental. São Paulo: Prentice Hall, 2002. 305 p.

EMBRAPA. GEOINFO, Infraestrutura de dados espaciais da embrapa. Disponível em: <http://geoinfo.cnps.embrapa.br/>. Acesso em: 14 nov. 2023.

EMBRAPA. Manual de Análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. 2 ed. ver. amp. – Brasília, DF: **EMBRAPA Informação Tecnológica**, 2009.

FIGUEIREDO, H. P.; FIGUEIREDO, C. R. P.; BARROS, J. H. S.; CONSTANTINO, M.; MAGALHÕES FILHO, F. J. C.; MORSES, P. M.; COSTA, R. B. Water quality in an urban environmental protection area in the Cerrado Biome, Brazil. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 191, n. 117, 2019.

GODOY, R. F. B.; CRISIOGIOVANNI, E. L.; TREVISAN, E.; RADOMSKI, F. A. D. Spatial and temporal variation of water quality in a watershed in center-west Paraná, Brazil. **Water Supply**, v. 21, n. 4, p. 1718-1734, 2021.

HEPP, L. U.; SANTOS, S. Benthic communities of streams related to different land uses in a hydrographic basin in southern Brazil. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 157, p. 305-318, 2009.

INSTITUTO SOCIOAMBIENTAL (ISA). Unidades de Conservação no Brasil. Disponível em: <https://uc.socioambiental.org/arp/1296>. Acesso em: 14 nov. 2023.

LANDS, J. R., KOCH, G. G. The measurement of observe agreement for categorical data. **Biometrics**, v. 31, p. 159–174, 1977.

NILSSON, C., MALM-RENÖFÄLT, B. Linking flow Regime and water quality in rivers: a challenge to adaptive catchment management. **Ecology & Society**, v. 13, n. 2, p. 18, 2008.

OLIVEIRA, E. Z.; MORAES, M. C. P.; FAUSTINO, A. S.; VASCONCELOS, A. F.; COSTA, C. W.; MOSCHINI, L. E.; MELANDA, E. A.; JUSTINO, E. A.; LOLLO, J. A.; LORANDI, R. Multi-temporal analysis of land use land cover interference in Environmental Fragility in a Mesozoic basin, southeastern Brazil. **Groundwater for Sustainable Development**, v. 12, p. 100536, 2020.

SENA, F. T. N. DE S; NETO, B. V. J. S; LEITE, A. C. DE S. Uso do geoprocessamento como subsídio à análise Ambiental: Imagem SRMT na geração dos mapas hipsométrico e de declividade e das bacias difusas da barragem Boa Esperança no estado do Piauí. **IV Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação**, 2012, p. 001-005.

SUERTEGARAY D.M.A., ROSSATO M.S., BELLANCA E.T., FACHINELLO A., CÂNDIDO L.A., SILVA C.R. Terra Feições Ilustradas. **Suertegaray D. M. A. (Org.)** 3º ed., Porto Alegre: Editora da UFRGS, 263 p., 2008.

NILSSON, C.; RENÖFÄLT, B. M. Linking flow regime and water quality in rivers: a challenge to adaptive catchment management. **Ecology and Society**, v. 13, n. 2, p. 18, 2008.

VANZELA, L.S.; HERNANDEZ, F.B.T.; FRANCO R.A.M. Influência do uso e ocupação do solo nos recursos hídricos do Córrego Três Barras, Marinópolis. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, n.1, p. 55-64, 2010.

VON SPERLING, M. Autodepuração dos cursos d'água. Belo Horizonte: DESA-UFMG, 1983.

YIRIGUI, Y.; LEE, SW; NEJADASHEMI, AP; HERMAN, MR; LEE, JW. Relações entre fragmentação de mata ciliar e indicadores biológicos de riachos. **Sustentabilidade**, Suíça, p.11, 2019.

CAPÍTULO II - AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO USO E OCUPAÇÃO DA TERRA NA QUALIDADE DAS ÁGUAS DOS CORPOS HÍDRICOS EM EM DIFERENTES CONDIÇÕES CLIMÁTICAS.

RESUMO

A degradação da vegetação ripária resultante de atividades antrópicas pode desencadear múltiplos impactos ambientais nos corpos hídricos, os quais são agravados durante períodos chuvosos. O estudo buscou avaliar a atuação da vegetação como filtro biológico na preservação da qualidade da água do Rio das Antas e a influência do uso e ocupação da terra no índice de qualidade da água (IQA) na ausência e na presença de um evento pluviométrico. Utilizando técnicas de sensoriamento remoto, mapeou-se o uso da terra na bacia do Rio das Antas e adotado 14 pontos de amostragem, onde aplicou-se *buffers* de 400 metros de raio. Foram feitas coletas de amostras de água do rio nos pontos de amostragem após não haver precipitação em 7 dias consecutivos e depois de um evento pluviométrico de 15,1mm, e por meio da caracterização calculou-se o IQA de cada ponto em sua respectiva condição climática. Realizou-se o tratamento estatístico dos dados por meio da análise de variância, clusterização e de componentes principais (ACP). Os resultados apresentaram uma variação no IQA quando comparado as condições, para alguns pontos, maiores valores após o evento de precipitação foram obtidos, assim como nos locais com maior porcentagem de vegetação. Na ACP, a primeira componente explicou cerca de 61,3% do agrupamento estando significativamente correlacionada com as variáveis: IQA, OD e pH, de maneira positiva, e negativamente com: P, N, DBO e *E.coli*, sofrendo influência da chuva, além do uso e ocupação. A segunda componente apresentou uma porcentagem de explicação de 22,5%, correlacionando com os parâmetros de turbidez, temperatura e resíduos totais, influenciada pela precipitação e pelo uso e ocupação da terra. Por meio dos dados apresentados, fica nítido a atuação das áreas vegetadas próximas aos corpos hídricos como filtro biológicos na qualidade das águas dos corpos hídricos.

Palavras-chave: índice de qualidade da água, área de preservação permanente, sensoriamento remoto.

ABSTRACT

The degradation of riparian vegetation resulting from anthropogenic activities can trigger multiple environmental impacts on water bodies, which are exacerbated during rainy periods. The study aimed to assess the role of vegetation as a biological filter in preserving water quality in the Antas River and the influence of land use and occupation on the Water Quality Index (WQI) in the absence and presence of a rainfall event. Using remote sensing techniques, land use was mapped in the Antas River basin, and 14 sampling points were selected, with 400-meter radius buffers applied. Water samples were collected at the sampling points after no precipitation for 7 consecutive days and after a rainfall event of 15.1mm, and the WQI of each point was calculated based on its respective climatic condition. Statistical treatment of the data was performed using analysis of variance, clustering, and principal component analysis (PCA). The results showed variation in WQI between periods, with some points showing higher values after precipitation events, as well as in areas with a higher percentage of vegetation. In PCA, the first component explained about 61.3% of the grouping and was significantly correlated with the variables: WQI, dissolved oxygen, and pH, positively, and negatively with: phosphorus, nitrogen, biochemical oxygen demand, and E.coli, influenced by rainfall, as well as land use and occupation. The second component explained 22.5% of the variance, correlating with turbidity, temperature, and total residues, influenced by precipitation and land use and occupation. Through the presented data, the role of vegetated areas near water bodies as biological filters in water quality preservation becomes evident.

Keywords: water quality index, permanent preservation area, remote sensing.

HIPÓTESE

A hipótese delineada neste capítulo postula que os fatores climáticos, notadamente a pluviosidade, exercem influência na qualidade das águas superficiais, sendo essa interferência atenuada na presença de cobertura vegetal.

1. INTRODUÇÃO

Devido a exigência da evolução das cidades, do comércio, da agricultura e das indústrias para suprir as necessidades da população, esse avanço tem acarretado uma urbanização desenfreada e desordenada, causando diversos impactos ambientais na natureza. Entretanto, grande parte das ações antropogênicas são executadas nas proximidades dos corpos hídricos e são capazes de desencadear um substancial degradação na qualidade dessas águas e na diversidade biológica, resultante das modificações nos componentes físicos, químicos e biológicos do ambiente (*OKUMURA et al.*, 2020). Conforme Von Sperling (2005), a qualidade da água em rios e mananciais guarda uma relação intrínseca com a utilização do solo e suas condições em uma determinada bacia ou microbacia hidrográfica.

Nas áreas ripárias, próximas aos corpos hídricos, mesmo diante da preservação das suas características naturais, é importante destacar que a composição da água pode sofrer impactos derivados da topografia superficial, bem como da infiltração no solo de resíduos provenientes de atividades domésticas e/ou defensivos agrícolas. Esses fatores também têm o potencial de ocasionar alterações nos atributos dos recursos hídricos (*AMINUL ISLAM et al.* 2018; *Mello et al.* 2018). Porém, esse problema é expressamente agravado devido a inexistência dessas áreas, uma vez que o escoamento superficial acentuado devido à má ocupação e gerenciamento da bacia hidrográfica, convergindo as águas oriundas da precipitação juntamente com demais poluentes carregados por ela até os corpos hídricos. Decorrente disso, nesse contexto, verifica-se um incremento na turbidez e coloração das águas, acompanhado do aumento nos níveis de sólidos em suspensão, cuja presença se correlaciona com o processo de assoreamento dos leitos hídricos (*OLIVEIRA-FILHO et al.*, 2007). Cabe destacar ainda que a ausência da área de preservação permanente (APP) desencadeia em grande parte das situações em problemas de

contaminação dos corpos hídricos relacionados a presença de diversos tipos de microrganismos patogênicos, aumento no teor de nutrientes como nitrogênio e fosforo, assim como da carga orgânica a qual está diretamente relacionada com o lançamento de esgotos domésticos e industriais nessas regiões.

Portanto, torna-se imprescindível a elaboração de políticas destinadas ao gerenciamento das bacias hidrográficas, com foco na preservação da qualidade das suas águas e na gestão sustentável, organizada e planejada, assim como, o monitoramento do avanço populacional nas bacias (ASCIUTTI; STANGANINI; MELANDA, 2019). Desta maneira, a regulamentação criteriosa do uso e da ocupação da bacia hidrográfica é identificada como a abordagem mais eficaz para o controle sustentável dos recursos hídricos, conforme evidenciado por Vaeza *et al.* (2010).

Todavia, diversas ferramentas são utilizadas para tal procedimento, dentre elas, cabe destacar a utilização de imagens de satélite e técnicas de sensoriamento remoto. A análise de imagens de satélite e caracterização espacial da bacia hidrográfica, em conjunto com a avaliação dos parâmetros de qualidade da água de um rio, possibilita a realização de um monitoramento preciso do estado atual do corpo hídrico em função da urbanização e do avanço antrópico. Isso permite a identificação dos problemas mais críticos relacionados à qualidade da água e a correlação destes com as alterações no uso e ocupação da terra aos seus arredores (SILVA, 2015). Por meio deste processo, é possível estabelecer uma relação direta entre a preservação do ambiente natural e o bem-estar da população, reforçando a importância da sustentabilidade e da gestão responsável dos recursos hídricos.

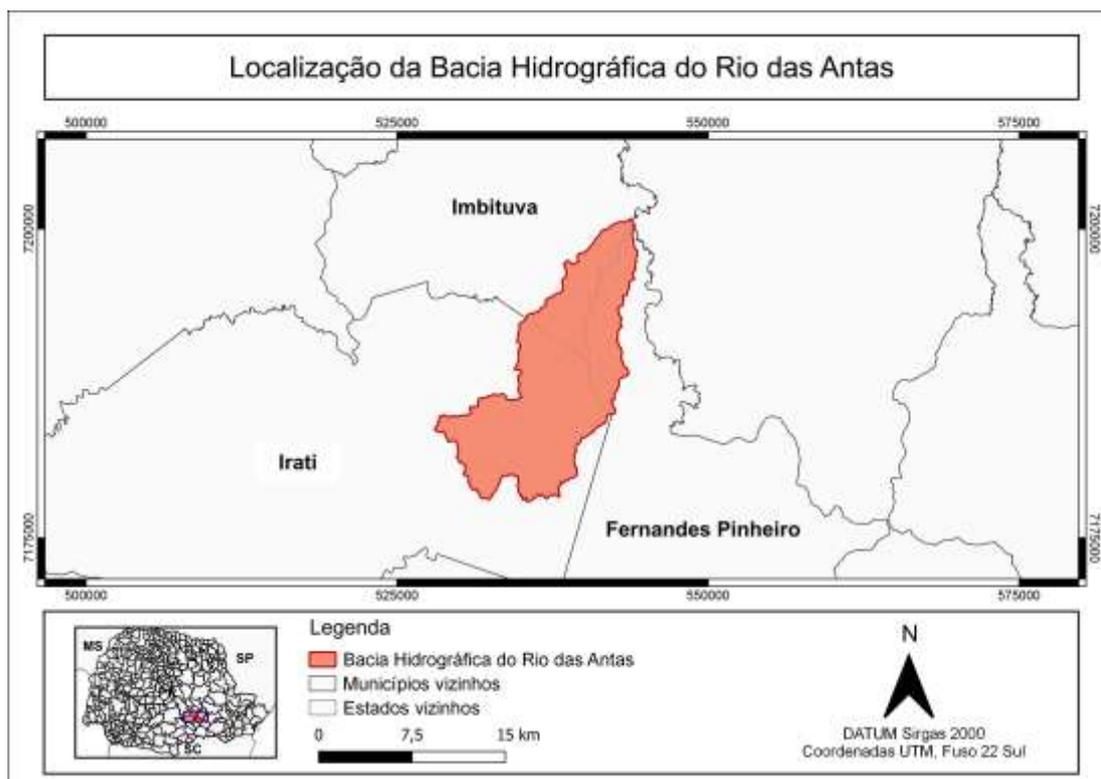
Outro mecanismo de monitoramento utilizado para diagnosticar e classificar a qualidade das águas dos corpos hídricos é por meio da utilização do índice de qualidade da água (IQA). O IQA desenvolvido pela *National Sanitation Foundation Institution* (NSF), o qual é uma ferramenta crucial para a avaliação integrada da qualidade da água, condensando múltiplas variáveis em um único valor numérico, facilitando a categorização da qualidade da água.

Diante deste exposto, o presente estudo tem como objetivo avaliar a qualidade da água do Rio das Antas, sendo este o principal afluente da Bacia Hidrográfica do Rio das Antas no estado do Paraná, por meio do IQA em função do uso e ocupação da terra na bacia em duas diferentes condições climáticas, com a ausência e presença de um evento de precipitação. Além

disso, enfatizar a atuação da vegetação como filtro biológico na preservação da qualidade da água dos corpos hídricos.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O objeto de estudo desta pesquisa se delimita à Bacia Hidrográfica do Rio das Antas, localizada nos municípios de Irati, Imbituva e Fernandes Pinheiro, no estado do Paraná, na região Sudeste estadual a qual possui cerca de 167km² de área. O local está inserido em uma região fitoecológica identificada como Floresta Ombrófila Mista, mais precisamente, na região de coleta dos pontos de amostragem, essa tipologia é caracterizada como Floresta Ombrófila Aluvial, em virtude da presença do corpo hídrico e de suas áreas de várzea correspondentes. O principal afluente da bacia hidrográfica em estudo é o Rio das Antas, que possui extensão aproximada de 80 km e segundo a Resolução Conama 357/2005, que classifica os corpos hídricos no território brasileiro, este rio é categorizado como Classe 2. A representação cartográfica da Bacia Hidrográfica do Rio das Antas pode ser visualizada na Figura 1.



Fonte: o Autor, 2024.

Figura 1. Localização geográfica da Bacia Hidrográfica do Rio das Antas.

2.1 Caracterização do relevo e do uso e ocupação da terra da bacia hidrográfica do rio das antas

Inicialmente, procedeu-se à demarcação da área de estudo, determinando seus limites com base nos divisores de água, representados pelos pontos de maior altitude, e em seu afluente principal. Essa delimitação foi executada por meio do *software QGIS versão 3.12.3*, por meio da ferramenta de vetores. Utilizando como referência a carta geográfica da área em estudo, proveniente da base cartográfica do Instituto Terras, Cartografia e Geologia do Paraná (ITCG), fornecida pelo Instituto Água e Terra (IAT), a vetorização foi conduzida. A carta específica escolhida, identificada pelo número 2839-4 com escala de 1:50.000 e resolução de escaneamento de 300 *dpi*. O Sistema de Referência Cartográfica (SRC) utilizado foi EPSG: 31982 – SIRGAS 2000 / UTM zone 22S.

2.1.1 Obtenção dos dados de elevação da Bacia Hidrográfica do Rio das Antas

Para a realização do mapa hipsométrico de elevação do terreno e de declividade da bacia hidrográfica em estudo, foi realizado o *download* do banco de dados de altimetria fornecidos pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), mais precisamente na plataforma *EarthData* com o auxílio do *Alaska Satellite Facility* (ASF). O satélite utilizado para aquisição dos dados foi o ALOS PALSAR, devido ao fato do mesmo apresentar uma resolução espacial dos seus pixels de 10 metros, portanto, resultando em uma imagem alta resolução em comparação aos demais que são disponibilizados de forma gratuita, tornando-o mais preciso e representativo.

Após realizar a busca na região desejada, optou-se por realizar o *download* do banco de dados nomeado como “AP 26898 FBD F6670 RT1”, sendo que o mesmo foi o que melhor se adequou na região de estudo. Os dados obtidos foram relacionados ao *Digital Elevation Model*, ou seja, do modelo digital de elevação do terreno (MDE).

2.1.2 Elaboração do mapa hipsométrico de elevação da Bacia Hidrográfica do Rio das Antas

Por meio dos dados de elevação do terreno obtidos, com o auxílio do *software* QGIS versão 3.12.3 foi gerado o mapa hipsométrico da Bacia Hidrográfica do Rio das Antas. Esse procedimento se deu primeiramente por meio do recorte da área de estudo utilizando da função “extrair *raster* pela camada de máscara”, ou seja, extraindo apenas os dados pertencentes a região da bacia. Em seguida, procedeu-se com a divisão e classificação dos dados altimétricos de acordo com as suas cores, alterando a simbologia da camada *raster* adicionada.

Para a seleção das cores, considerou-se a condição de que valores de altimetria superiores tem cores mais quentes e valores de altimetria menores possuiriam cores mais frias, como normalmente é utilizado em mapas hipsométricos. Os dados foram, portanto, divididos em 8 classes, com limite mínimo de 700 metros de elevação e limite máximo de 1050 metros,

o intervalo utilizado entre as classes foi de 50 metros. Por fim, utilizou-se do compositor de impressão do próprio *software* para gerar o mapa com seus itens principais.

2.1.3 Elaboração do mapa de declividade da Bacia Hidrográfica do Rio das Antas

Utilizando dos dados provenientes do Modelo Digital de Elevação previamente adquirido, foi elaborado o mapa de declividade da área em estudo também no *software* QGIS versão 3.12.3, extensão SAGA. Para tal procedimento, a cama *raster* avaliada foi adicionada e por meio da ferramenta “*Terrain Models*” na função “*slope*”, gerou-se o mapa de declividade da região em estudo.

Posteriormente, os valores foram transformados em porcentagem e gerado a classificação dos seus valores com suas respectivas cores. Em seguida, empregou-se o compositor de impressão integrado ao *software* para a geração do mapa contendo seus elementos principais.

2.1.4 Elaboração do mapa de uso e ocupação da terra da Bacia Hidrográfica do Rio das Antas

Durante um período de um ano (de janeiro de 2022 a janeiro de 2023), uma pesquisa foi conduzida nos bancos de dados na região da área de estudo para a cartografia de uso e ocupação da terra. As imagens mais representativas foram identificadas e o *download* foi realizado, incluindo as bandas do espectro azul, vermelho, verde e infravermelho. Essas imagens foram adquiridas por meio da plataforma digital do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), utilizando o satélite CBERS4AWPM, que possui uma resolução espacial de 8 metros. Usando o *software* QGIS 3.12.3, as imagens da área de estudo foram georreferenciadas e recortadas para a área desejada (B.H. do Rio das Antas). Após o recorte, as camadas *raster* foram mescladas, resultando em uma nova camada. O produto gerado seguiu o SRC dos projetos relacionados, o EPSG: 31982 – SIRGAS 2000 / UTM zone 22S.

A classificação supervisionada do uso e ocupação da terra foi realizada utilizando o complemento “*Semi-Automatic Classification*” do software QGIS. Neste processo, foram coletadas 50 amostras para cada tipo de uso do solo, incluindo floresta nativa, reflorestamento, pastagem, solo exposto, área urbana e agricultura. A coleta das amostras foi realizada por meio da criação de formatos geométricos livres sobre a área da bacia, especificamente nas regiões onde os usos pré-determinados foram avaliados. Cada amostra foi então atribuída a uma cor específica para representar seu uso correspondente.

Após a coleta das amostras, o processo de classificação foi realizado. Para isso, utilizou-se a função “*band processing - classification*” do complemento “*Semi-Automatic Classification*”. Esta função emprega o algoritmo “*maximum likelihood*”, que classifica cada pixel com base na maior semelhança estatística entre o pixel e as amostras coletadas.

A determinação do raio para a criação dos buffers foi realizada com base na escala dos usos da terra presentes na bacia, considerando que alterações na qualidade da água dos corpos hídricos até uma distância de 500 metros podem afetar a comunidade aquática segundo Yirigui *et al.*, (2019). Portanto, um *buffer* com um raio de 400 metros foi delimitado a partir de cada um dos pontos de amostragem adotados, após a obtenção do mapeamento dos usos da terra, e a área foi recortada. Com a geração dos *buffers* e suas respectivas classes de uso e ocupação de terra, a ferramenta de processamento “*r.report*” foi utilizada para calcular a área ocupada por cada uso dentro de cada região avaliada e para realizar a análise de proximidade dos pontos.

Com o intuito de avaliar a precisão da classificação do uso e ocupação da terra gerada, foi calculado o Índice Kappa (K) por meio da Equação 1.

$$K = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^y x_{ii} - \sum_{i=1}^y (x_{i+} \cdot x_{i+})}{n^2 - \sum_{i=1}^y (x_{i+} \cdot x_{i+})} \quad \text{(Equação 1)}$$

Em que:

$\sum_{i=1}^y x_{ii}$ = a soma da diagonal da matriz de confusão;

n = o número total de amostras que representam o uso e ocupação da terra e da cobertura observado no campo;

x_{i+} = a soma das linhas da matriz de confusão;

x_{+i} = a soma das colunas da matriz de confusão.

A partir da obtenção do índice, realizou-se a interpretação do valor obtido para Kappa por meio da classificação proposta por Landis e Koch (1977), conforme Tabela 1.

Tabela 1. Interpretação dos valores do índice Kappa para a classificação do uso e ocupação da terra.

Valores de Kappa	Classificação
< 0	Péssima
0,00 – 0,019	Ruim
0,20 – 0,39	Razoável
0,40 – 0,59	Boa
0,60 – 0,79	Ótima
0,80 – 1,0	Excelente

Fonte: Landis e Koch (1977)

2.2 Implementação dos locais de coleta e execução da amostragem da água do Rio das Antas

Para a escolha dos pontos de amostragem nas coletas de amostras de água do Rio das Antas, foram ponderados diversos fatores. A disponibilidade de acesso às propriedades privadas, como residências, chácaras, empresas e fazendas, assim como a facilidade de acesso ao corpo hídrico, foi considerada. Além disso, foram levados em conta elementos como a localização de indústrias, da estação de tratamento de esgotos (ETE), habitações residenciais, áreas de cultivo agrícola, pastagens, reflorestamento e matas nativas nas proximidades do corpo hídrico. A escolha dos pontos também considerou os usos do solo mencionados.

A adoção de 14 pontos de amostragem ao longo do Rio das Antas, que se inicia na nascente (ponto 1) e se estende até a foz (ponto 14), fundamentou-se em uma análise minuciosa da distribuição dos usos do solo mencionados anteriormente. A seleção deste número particular de pontos de amostragem foi fundamentada na hipótese de que as propriedades da água em locais geograficamente próximos seriam homogêneas, considerando a influência das dinâmicas fluviais naturais.

Para realização das coletas das amostras de água do Rio das Antas foram adotadas duas condições climáticas:

- **Ausência de precipitação:** onde não houvesse precipitação na área da Bacia Hidrográfica do Rio das Antas por sete dias consecutivos.
- **Presença de precipitação:** logo após haver um evento de precipitação em toda área da Bacia Hidrográfica do Rio das Antas (precipitação no dia da coleta: 15,1mm segundo os dados disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (Inmet)).

A adoção das duas condições anteriormente citadas foi com o intuito de avaliar a capacidade de retenção de materiais poluentes nas margens dos rios devido a presença da vegetação e a atuação dessas áreas como filtros biológicos. Pois, conforme apontado por Nilsson e Renöfält (2008), as mudanças na taxa de fluxo resultantes da precipitação exercem uma influência imediata sobre a qualidade da água dos corpos hídricos.

As amostras de todos os pontos foram coletadas em três seções superficiais do rio (laterais e centro) em cada uma das unidades amostrais originando uma amostragem composta do local e realizadas em um único dia na sua respectiva condição climática. As águas foram coletadas em frascos de 300ml previamente autoclavados submetidas as análises laboratoriais em menos de 24 horas após a realização das mesmas.

2.3 Análises laboratoriais das amostras e cálculo do índice de qualidade da água

As amostras coletadas em ambas as condições climáticas foram caracterizadas por meio dos parâmetros apresentados no Quadro 1 seguindo as metodologias indicadas no *Standart Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2017).

Quadro 1. Indicadores utilizados na avaliação das características da água do Rio das Antas.

Parâmetros	Unidades
Demanda bioquímica de oxigênio (DBO)	(mg/L)
<i>Escherichia coli</i> (<i>E.coli</i>)	(CF/100ml)
Resíduos totais (RT)	(mg/ton)
Oxigênio dissolvido (OD)	(%)
Nitrogênio total (N)	(mg/L)
Fósforo total (P)	(mg/L)
Temperatura (T)	(ΔT)
Turbidez (Turb.)	(NTU)
pH	-

Fonte: O Autor, 2024.

Posteriormente a coleta e caracterização das amostras por meio dos parâmetros citados no Quadro 1, realizou-se o cálculo do índice de qualidade da água (IQA) para cada um dos pontos avaliados em suas respectivas condições climáticas. O cálculo do IQA foi realizado de acordo com a metodologia concebida pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (Cetesb) e Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) (Cetesb, 2019). Através da utilização do IQA, é possível realizar uma classificação pontual do estado da água em determinado trecho do corpo hídrico em péssima, ruim, razoável, boa e ótima.

Conforme indicado por Landwehr e Deininger, o cálculo do Índice de Qualidade da Água seguiu a formulação exposta na Equação 2 (1976, *apud* em BRASIL, 2001).

$$IQA = \prod_{i=1}^n q_i^{w_i}$$

(Equação 2)

Em que:

IQA: índice de qualidade da água (limites de 0 a 100);

qi: qualidade do parâmetro i, obtido pela curva média específica de qualidade;

wi: peso atribuído ao parâmetro em função de sua importância na qualidade entre 0 e 1.

2.4 Análise estatística dos dados

Com o propósito de examinar agrupamentos potenciais entre os usos da terra em cada ponto de amostragem avaliado, empregou-se a técnica multivariada conhecida como análise de agrupamento, ou *cluster analysis*, a qual visa agrupar objetos com base em suas características (HAIR *et al.*, 2005). No contexto deste estudo, adotou-se o método de agrupamento particional com o algoritmo *k-means*, fundamentado na determinação de centroides utilizando o *software R*.

Para verificar se houve diferença estatística entre os valores de IQA em ambas as condições climáticas avaliadas, foi realizado o teste de comparação de médias, a análise de variância (ANOVA), com nível de confiança de 95% e posteriormente o teste de Fisher utilizando $\alpha = 0,05$.

Além disso, os dados referentes aos 14 pontos amostrados nas condições climáticas avaliadas, com e sem evento pluviométrico, foram compilados em uma matriz e submetidos a uma análise de componentes principais (ACP), para tanto foram consideradas significativas as componentes com autovalor maior que 1. O objetivo foi evidenciar mediante o diagrama de ordenação gerado pela ACP, diferentes agrupamentos, especialmente em função de ambas condições climáticas e determinar quais dos parâmetros: pH, OD, N, P, Temperatura, RT, Turbidez, *E. coli*, IQA, DBO, influenciaram de forma efetiva a ordenação verificada. Importante ressaltar que a ACP também foi utilizada para determinar correlações entre os parâmetros supracitados.

Análises de variância com dois fatores sendo:

- Condição climática: ausência do evento pluviométrico e presença do evento pluviométrico;
- Ponto amostral:
 - Preservado → mais de 70% de área com floresta nativa
 - Alterado → menos de 70% de área de floresta nativa.

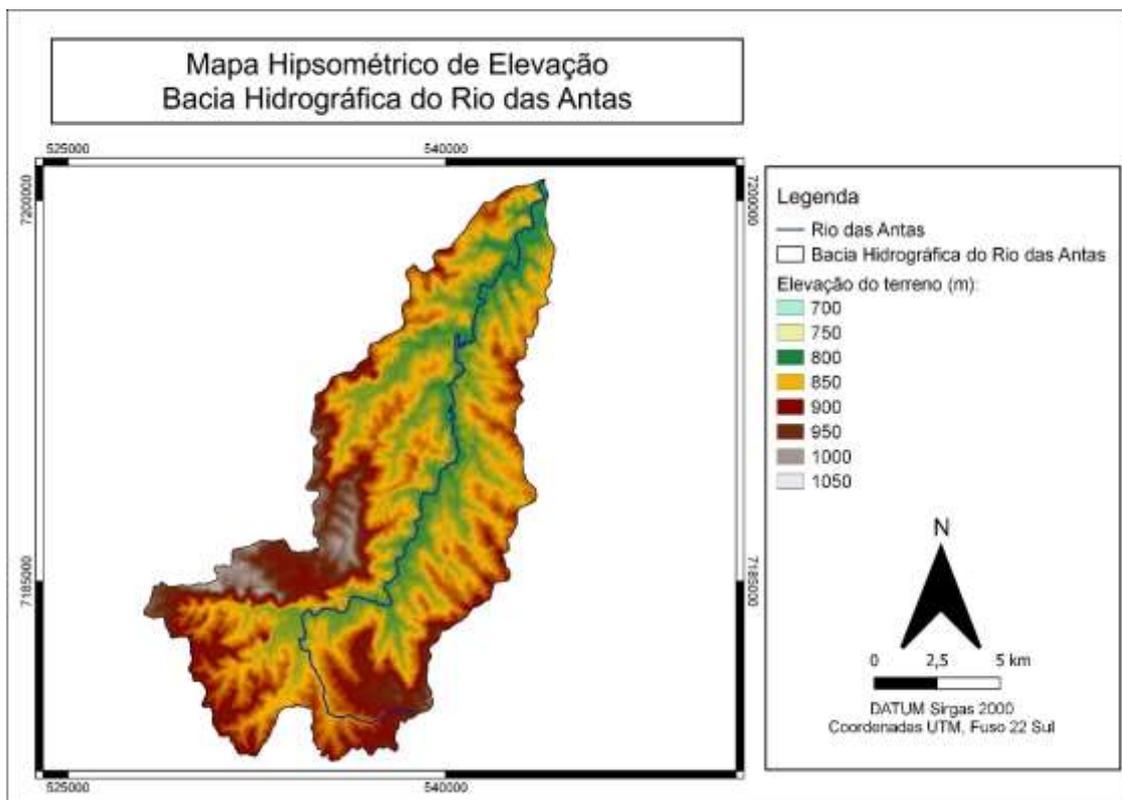
Foram calculadas para cada parâmetro e utilizou-se dos modelos lineares generalizados mistos.

O nível de confiança foi de 95% para todas as análises. Os cálculos foram efetuados com auxílio do *software Rstudio*. Premissas de gaussianidade e homogeneidade foram averiguadas pelos testes de Shapiro-Wilks e Bartlett respectivamente.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise espacial do relevo da área de estudo

Por meio da análise espacial dos dados obtidos do relevo local, gerou-se os mapas hipsométrico de elevação e declividade os quais estão apresentados na Figura 2 e 3.

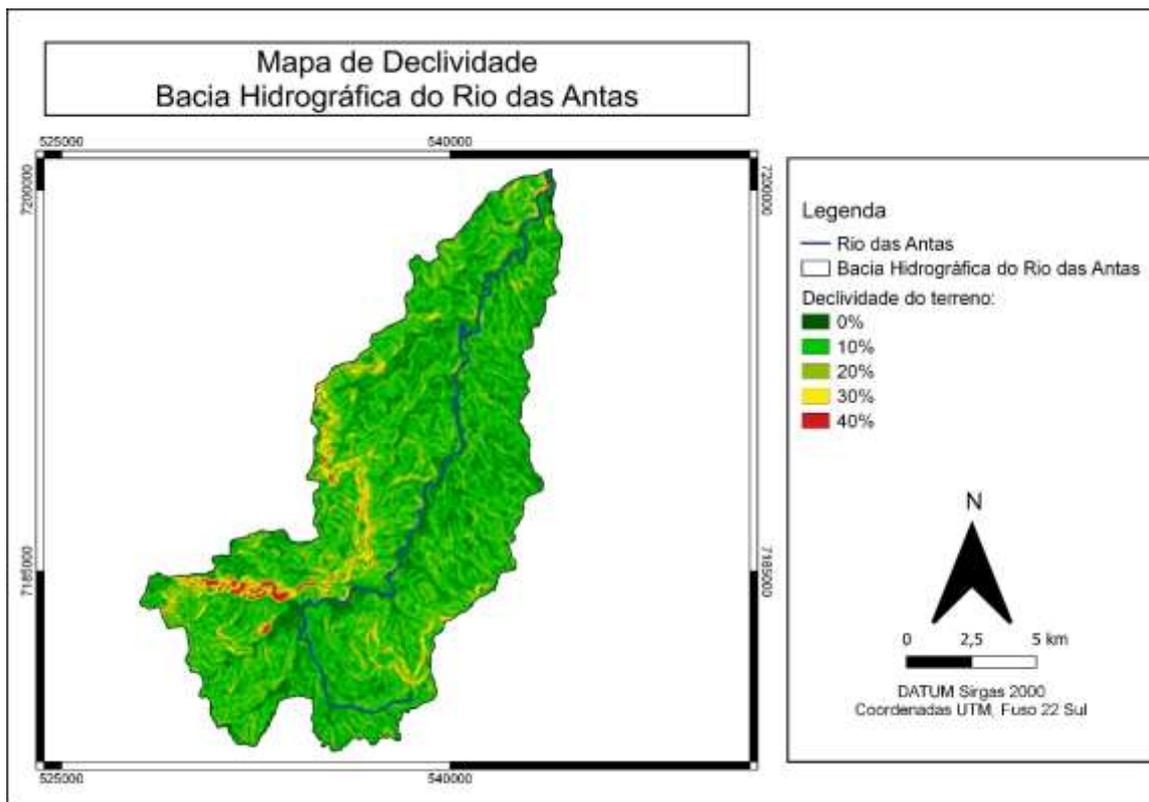


Fonte: o Autor, 2024.

Figura 2. Mapa hipsométrico de elevação da Bacia Hidrográfica do Rio das Antas.

Por meio da análise da Figura 2, pode-se verificar uma variação colorimétrica em função dos dados de elevação já esperada em bacias hidrográficas, apresentando maiores valores de altimetria a montante e nas extremidades laterais das mesmas, sendo estes os divisores de água. Da mesma maneira, menores valores altimétricos são vistos nas regiões centrais da bacia, principalmente onde se encontra o seu rio principal (Rio das Antas) e seus demais afluentes. Decorrente dos valores altimétricos obtidos a partir da análise espacial da B. H. do Rio das Antas, conclui-se que os mesmos variam entre 1050 metros nas regiões mais elevadas e 700 metros nas regiões mais baixas em função do nível do mar.

A caracterização do relevo local por meio de dados espaciais torna-se de extrema importância para o conhecimento da dinâmica pluvial e fluvial da área de estudo, uma vez que estes são responsáveis pelo encaminhamento das águas de precipitação por meio do escoamento superficial para as regiões de menores cotas, podendo carrear diversos compostos poluentes até os copos hídricos. Os estudos ambientais em relação as características físicas de grandes áreas como bacias hidrográficas de médio ou grande porte, conforme destacado por Cavazzi *et al.* (2013), não podem ser realizados de maneira muito abrangente, principalmente devido a sua intrínseca complexidade e os detalhes associados, portanto, torna-se de grande importância uma maior generalização dos dados principalmente a partir de MDEs e imagens de satélite.



Fonte: o Autor, 2024.

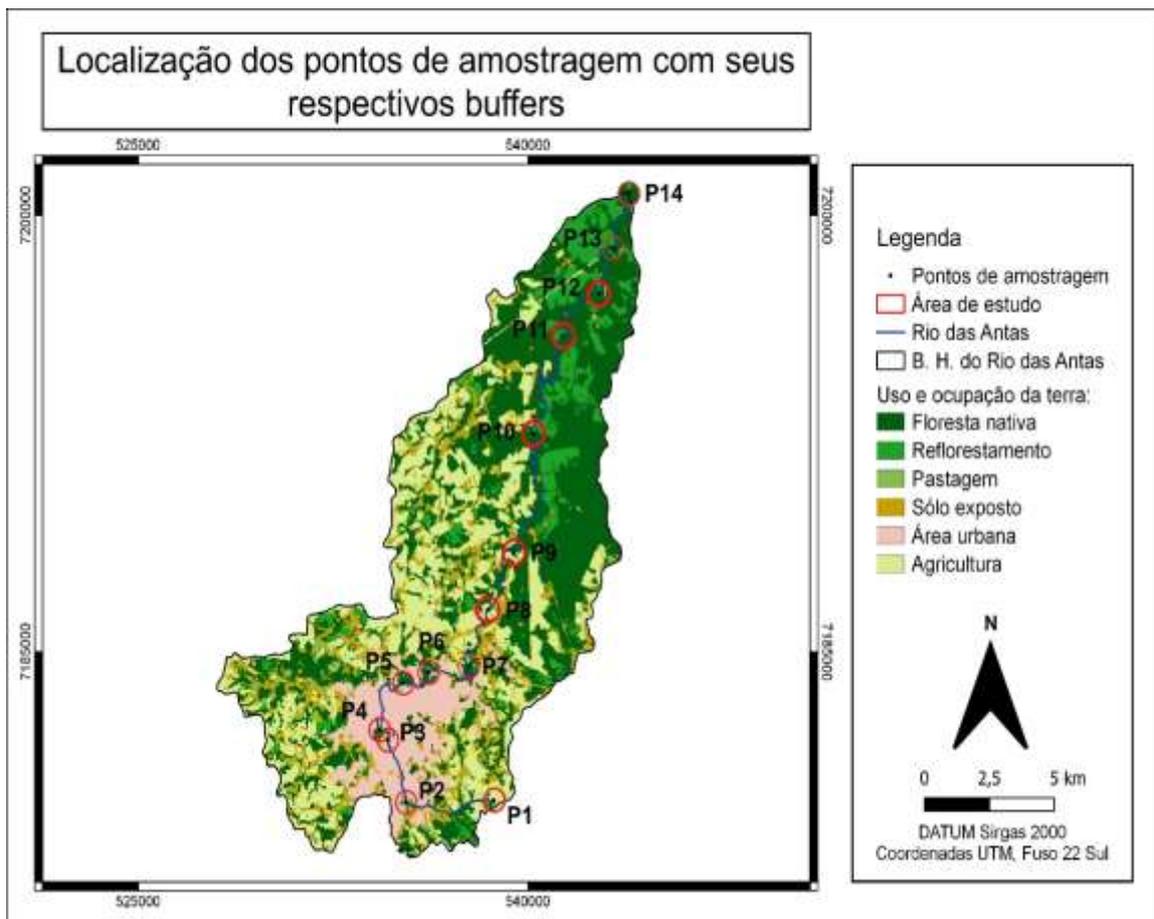
Figura 3. Mapa de declividade da Bacia Hidrográfica do Rio das Antas.

Quando avaliado a declividade, este parâmetro apresentou valores variando entre 0% e 40%, predominando principalmente porcentagens entre 0% e 10% em sua maior parte da bacia hidrográfica. A declividade média obtida foi de 10,2%, ou 0,102 m/m, onde em média, a área de estudo possui uma elevação de 0,102m a cada um metro de distância horizontal percorrida.

Assim como a elevação do terreno, a declividade pode ser um fator preponderante na interferência na qualidade das águas dos corpos hídricos, ainda mais quando assimilado a falta de vegetação e a ausência de áreas de preservação permanente, potencializado na presença de eventos pluviométricos. Portanto, em regiões com declives, a qualidade das águas superficiais em bacias e microbacias pode ser influenciada por vários usos do solo que estão relacionados às características ambientais e ecológicas, como por exemplo a urbanização, a agricultura, as pastagens e demais tipos de usos os quais tendem a alterar as condições naturais do meio (ARAÚJO *et al.*, 2010).

3.2 Caracterização do uso e ocupação da terra

Ao realizar o estudo do uso e ocupação da terra da bacia hidrográfica do Rio das Antas, foi obtido o mapa apresentado na Figura 4, a qual contém a distribuição dos usos no decorrer da bacia, assim como, a representação dos pontos de amostragem e seus respectivos *buffers*.



Fonte: o Autor, 2024.

Figura 4. Mapa de uso e ocupação da terra da Bacia Hidrográfica do Rio das Antas contendo os respectivos pontos amostrais.

Após a obtenção do mapa de uso e ocupação da terra da área de estudo, foi calculado a área pertencente a cada classe avaliada, assim como, a porcentagem a qual a mesma representa

em função da área total da bacia hidrográfica. Os resultados obtidos estão presentes na Tabela 2.

Tabela 2. Quantidade de área pertencente a cada uso e ocupação da terra avaliado e suas respectivas porcentagens em função da área total da bacia hidrográfica.

Uso e ocupação da terra	Área (km ²)	Porcentagem (%)
Floresta nativa	77,72	46,31
Reflorestamento	10,88	6,48
Pastagem	9,11	5,42
Solo exposto	4,48	2,67
Área urbana	22,52	13,42
Agricultura	43,09	25,67
ÁREA TOTAL	167,82	100

Fonte: o Autor, 2024.

Da mesma maneira, calculou-se as porcentagens referentes a cada uso e ocupação da terra nos *buffers* de cada ponto de amostragem e os valores obtidos estão dispostos na Tabela 3.

Tabela 3. Quantidade de área pertencente a cada uso e ocupação da terra avaliado e suas respectivas porcentagens em função da área total do *buffer*.

Pontos	Porcentagem dos usos e ocupação da terra (%)					
	Floresta	Reflores.	Pastag.	Solo exp.	Agricult.	Área Urb.
Ponto 1	20,02	0,17	11,18	0,65	66,14	1,82
Ponto 2	6,59	0	9,39	3,11	0	80,90
Ponto 3	15,81	0	4,51	2,25	0	77,42
Ponto 4	24,57	0	4,84	3,82	0	66,74
Ponto 5	32,93	0	10,38	1,03	0	55,63
Ponto 6	46,83	0	6,44	3,19	0,66	42,85
Ponto 7	52,14	5,07	8,08	13,65	9,25	5,64
Ponto 8	42,22	2,03	11,13	0,32	39,63	2,60
Ponto 9	71,50	0	1,27	0,96	23,67	2,57
Ponto 10	76,84	13,75	5,66	0	3,73	0
Ponto 11	80,12	19,87	0	0	0	0
Ponto 12	82,28	3,67	14,03	0	0	0
Ponto 13	62,87	18,08	19,04	0	0	0
Ponto 14	82,99	10,43	6,56	0	0	0

Fonte: o Autor, 2024.

Por meio da Figura 4 e da Tabela 2, pode-se verificar que a Bacia Hidrográfica do Rio das Antas possui uma certa heterogeneidade em sua composição dos usos e ocupação da terra, porém, destacam-se com maiores porcentagens as áreas de floresta nativa (46,31%) e

agricultura (25,67%) e posteriormente as áreas urbanizadas (13,42%). Essa distribuição corrobora as características dos municípios a qual se encontra a bacia hidrográfica em questão, os quais estão localizados no interior do estado do Paraná, possuem baixo número de habitantes e tem como uma das principais atividades a agricultura.

Após a validação, ficou evidenciado que a classificação está em consonância com a área de pesquisa, apresentando um Índice Kappa de 0,8185. Esse resultado é interpretado como uma classificação de excelência em termos de uso e ocupação da terra, de acordo com a definição de Lands e Koch (1997).

Quando avaliado os pontos de amostragem e seus respectivos usos dentro do raio de 400 metros em função das suas porcentagens, observa-se por meio da análise de *clusters* um agrupamento dos dados entre os pontos, separando os mesmos entre regiões com predominância de área urbana, agricultável e vegetada. O agrupamento obtido está disposto na Tabela 4.

Tabela 4. Análise de *clusters* e formação de agrupamentos em função das porcentagens dos usos e ocupações da terra nos *buffers* avaliados.

Pontos de amostragem	Cluster	Grupos
1	1	Agricultura
2	2	Urbana
3	2	Urbana
4	2	Urbana
5	2	Urbana
6	2	Urbana
7	1	Agricultura
8	1	Agricultura
9	3	Vegetada
10	3	Vegetada
11	3	Vegetada
12	3	Vegetada
13	3	Vegetada
14	3	Vegetada

Fonte: o Autor, 2024.

Ao observar a Tabela 4, verifica-se os agrupamentos formados, destacando-se as áreas vegetadas a partir do ponto 9 até o ponto 14, as quais fazem parte da Floresta Nacional de Irati, assim como os pontos 2, 3, 4, 5 e 6 localizados na região urbana do município de Irati-PR. Já os pontos 1, 7 e 8 se encontram nas extremidades da área urbanizada e se caracterizam por

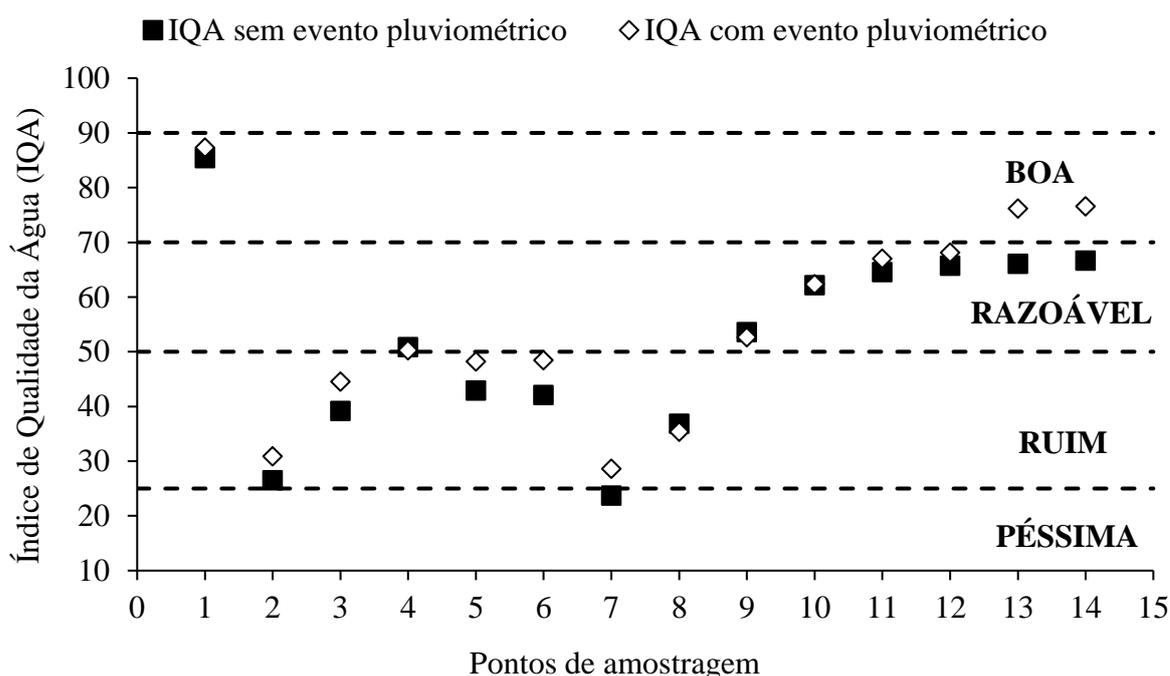
possuir algum tipo de cultivo agrícola. Esse agrupamento corrobora o que é apresentado na Figura 4.

3.3 Avaliação da qualidade da água do rio das antas em função do uso e ocupação da terra e das condições climáticas

Os resultados provenientes da avaliação da qualidade da água, em consideração ao uso e ocupação da terra na Bacia Hidrográfica do Rio das Antas, foram organizados com base no índice de qualidade da água, nos parâmetros analisados e nas principais componentes influenciadoras, os quais estão detalhadamente apresentados nos itens subsequentes.

3.3.1 Avaliação do Índice de Qualidade da Água

Ao efetuar o cálculo do IQA em cada um dos pontos de amostragem durante ambas as condições climáticas, os valores correspondentes foram obtidos e estão representados na Figura 5.



Fonte: o Autor, 2024.

Figura 5. Valores do índice de qualidade da água obtidos em cada um dos pontos de amostragem em suas respectivas condições avaliadas.

Ao observar a Figura 5, nota-se grande similaridade entre alguns pontos, assim como, disparidade entre outros quando comparado ambas as condições os avaliados em função do IQA. Esse comportamento é comprovado por meio da análise de variância, onde por meio desta, foi concluído haver diferença estatística entre as condições avaliados ($p < 0,05$) quando utilizado intervalo de confiança de 95%.

Após observar a diferença, utilizando do teste de Tukey HSD ($\alpha = 0,05$), corroborou-se o resultado obtido, assim como, conclui-se que os pontos 4, 8, 9, 10 mostraram iguais quando comparados ambos as condições. Os demais pontos que apresentaram diferença estatística em relação à precipitação provavelmente decorreram da diluição da água do corpo hídrico durante as chuvas, mesmo com um aumento no teor de sólidos, resultando em valores mais elevados de turbidez. É relevante destacar que, no IQA, a *E. coli*, um parâmetro de maior peso, aparentemente teve suas contribuições estabilizadas, uma vez que o escoamento superficial exerce impacto mínimo nesse parâmetro, e o maior volume de água durante as chuvas

contribuiu para a diluição. Conseqüentemente, o valor final do IQA demonstrou-se superior na presença de evento pluviométrico em comparação da sua ausência.

Durante ambas as condições avaliadas, observa-se de maneira evidente o incremento do IQA em decorrência das áreas vegetadas. Notavelmente, a partir do ponto 9 até o ponto 14, pertencentes ao cluster 3, verifica-se um aumento substancial no índice. Esse aumento é atribuído ao processo de autodepuração do rio, o qual é favorecido pelas áreas de preservação e pela ausência de atividades antrópicas nesses locais, que segundo Von Sperling (2014), pode ser interpretada como um fenômeno de sucessão ecológica, no qual a restauração do equilíbrio no ambiente aquático, ou seja, a busca pelo estágio inicial existente antes da introdução de efluentes, é conduzida predominantemente por mecanismos naturais. Importante ressaltar que com a presença da chuva, esse aumento na qualidade da água foi ainda mais elevado.

Os dados obtidos são corroborados por meio do estudo conduzido por Cornelli *et al.* (2016), onde foi constatado que a presença de vegetação nativa em sub-bacias localizadas no município de Caxias do Sul, RS, desempenha um papel significativo na mitigação da carga de poluentes lançados nos corpos d'água, resultando em uma melhoria substancial na qualidade da água.

3.3.2 Avaliação do comportamento dos parâmetros de qualidade da água em função das condições climáticas avaliadas

Quando comparado estatisticamente ambas as condições climáticas em termos dos parâmetros de qualidade da água em função dos usos da terra, com o intuito de verificar a existência da influência da precipitação nos mesmos, foram obtidos os dados apresentados na Tabela 5, onde as médias seguidas das mesmas letras não diferem estatisticamente pelo teste de Fisher.

Tabela 5. Teste de médias aplicado aos pontos de amostragem em função dos usos da terra, da condição climática e dos parâmetros de qualidade da água.

Grupos	Clima	O.D	<i>E.coli</i>	pH	DBO₅	N	P	T	R. T.	Turb
Urbana	Seco	75,3 b	38500 a	6,9 a	17,8 a	12,5 a	3,9 a	2 a	129,8 b	14,8 cd
Urbana	Chuva	77,0 b	4000 b	6,4 b	14,7 a	8,3 b	2,65 a	2 a	216,2 a	64,7 a
Agricult.	Seco	81,0 ab	3670 b	7,0 a	9,3 bc	6,4 bc	1,54 ab	1,7 ab	68,3 c	10,4 cd
Agricult.	Chuva	81,3 ab	3670 b	6,7 a	9,0 bc	6,0 bcd	1,41 ab	1,7 ab	130,4 b	34 b
Veget.	Seco	87,6 a	1000 c	7,1 a	4,9 c	2,8 cd	0,7 b	1,5 b	67,0 c	7,6 d
Veget.	Chuva	88,0 a	640 c	6,8 a	2,6 c	1,5 d	0,085 b	1,5 b	112,1 b	20,5 c
Unidades		(%)	CF/100ml		mg/L	mg/L	mg/L	ΔT	mg/Ton	NTU

Fonte: o Autor, 2024.

A análise estatística da porcentagem de oxigênio dissolvido nas águas do Rio das Antas revelou diferenças significativas apenas entre os pontos de amostragem ($p < 0,05$), com a precipitação não afetando esse parâmetro. As médias mais altas de OD foram observadas em áreas predominantemente vegetativas, seguidas por regiões agrícolas e, em menor escala, áreas urbanizadas. Nas áreas urbanas, a presença de esgotos domésticos lançados diretamente exerce influência direta sobre o OD, pois o oxigênio dissolvido é consumido por bactérias aeróbias durante o processo de degradação do material orgânico presente nesses efluentes. A diminuição da concentração de oxigênio dissolvido acarreta diversas implicações ambientais, destacando-se como um dos principais desafios no contexto da poluição das águas, conforme referenciado por Hспанhol (2009).

A análise estatística das concentrações de *E. coli* em amostras de água, por meio de ANOVA e teste de Tukey, revelou diferenças significativas ($p < 0,05$) entre as médias avaliadas nos pontos e nas condições climáticas amostradas. As concentrações foram mais elevadas em áreas urbanas durante a ausência de chuva, seguido pela sua presença. Isso se dá principalmente devido ao lançamento de esgotos domésticos sem seu devido tratamento no corpo hídrico, uma vez que este microrganismo se configura como o único indicador de contaminação fecal em água, associando-se exclusivamente a vestígios de fezes. Além disso, sua presença denota contaminação fecal recente em corpos d'água (WHO, 2011). Em contraste, valores mais baixos

foram observados em áreas agrícolas e vegetadas, sem influência significativa das condições climáticas analisadas nessas regiões.

O pH, por sua vez, foi influenciado unicamente pela precipitação ($p < 0,05$), sem alterações em relação à localização dos pontos de amostragem. Na área urbana, com a presença do evento pluviométrico, observou-se um leve, porém significativo, decréscimo no pH. Em contrapartida, em outras condições e usos avaliadas, os valores do pH não diferem estatisticamente.

As concentrações de demanda bioquímica de oxigênio (DBO) diferiram apenas entre os pontos de amostragem em relação aos usos ($p < 0,05$), não sendo afetadas pelas condições climáticas. Valores mais altos de DBO foram registrados em áreas urbanizadas, intermediários em regiões agrícolas e menores em locais vegetados. Essas elevadas concentrações nas áreas urbanas, resultam principalmente de descartes inadequados de efluentes domésticos. O crescimento populacional nas áreas de várzea muitas vezes leva ao despejo direto de esgoto nos corpos d'água ou em sistemas de fossas mal projetadas, permitindo a infiltração no solo e atingindo rios e lençóis freáticos.

A análise de variância para o parâmetro de nitrogênio total indicou diferença estatística nas concentrações em relação aos pontos de amostragem e as condições climáticas avaliadas ($p < 0,05$). As regiões urbanas apresentaram as maiores concentrações, influenciadas pela precipitação, com destaque para ausência de chuva, sugerindo que a origem predominante do nitrogênio em áreas urbanas é o lançamento de esgotos domésticos, não o escoamento superficial. Todavia, as concentrações de nitrogênio na água são diluídas em dias chuvosos.

Por outro lado, valores mais baixos de nitrogênio total foram observados nas áreas vegetadas, com equivalência estatística às áreas de agricultura durante na presença do evento pluviométrico, destacando a importância dessas áreas na ausência de urbanização. O resultado ressalta a contribuição significativa do lançamento de esgotos para as altas concentrações de nitrogênio nos corpos hídricos. Apesar da possibilidade da agricultura agravar a situação com a chuva, a presença de parte de mata ciliar nas regiões agrícolas possivelmente atuou na retenção do escoamento superficial e lixiviação dos nutrientes do solo.

Ao analisar a presença de fósforo nas águas, observou-se diferença estatística apenas entre os pontos avaliados ($p < 0,05$), sem influência significativa da precipitação. As

concentrações mais elevadas de fósforo foram registradas nos pontos localizados em regiões urbanizadas, enquanto as mais baixas foram encontradas em áreas preservadas. Valores intermediários foram observados em locais predominantemente agrícolas. Apesar de que é sabido que o escoamento superficial em condições chuvosas em áreas agrícolas as quais passam pelos processos de fertilização química, ou adubadas com desejos, pode transportar os nutrientes (N e P) presentes no solo até as áreas mais adjacentes, onde comumente encontram-se os rios, essa relação não foi obtida no presente estudo (CETESB, 2014; VON SPERLING, 1996). Este padrão de comportamento também pode ser atribuído à variação da temperatura nas amostras.

Os resíduos totais mostraram diferença estatística entre pontos de amostragem e em função das condições climáticas ($p < 0,05$). A maior média ocorreu em áreas urbanas durante chuvas, a menor em locais vegetados sem precipitação, equivalendo estatisticamente a áreas agrícolas. Áreas vegetadas e agrícolas durante chuvas apresentaram concentrações intermediárias, comparáveis às obtidas em condições de seca na zona urbana, destacando a relevância da vegetação.

A análise da turbidez da água revelou variações significativas entre os pontos de amostragem e as condições climáticas ($p < 0,05$), destacando que com a chuvosa como responsável pelos maiores níveis de turbidez em todas as classes, especialmente nas áreas urbanizadas e agrícolas. Durante chuvas, a vegetação mostrou-se crucial, apresentando menor turbidez comparada a outras classes. Na ausência de chuva, as áreas vegetadas proporcionaram as melhores condições em relação à turbidez, enquanto as áreas urbanas e agrícolas foram estatisticamente similares. Cabe destacar ainda que além de suas propriedades filtrantes, a vegetação também desempenha um papel vital na estabilização das margens dos corpos d'água, prevenindo a erosão do solo (CARMO *et al.*, 2010). Isso é crucial para manter a qualidade da água, pois a erosão do solo pode transportar sólidos para os corpos hídricos, resultando em turbidez e poluição como corroborado nos estudos de Lima *et al.*, 2015.

Portanto, por meio da caracterização da água em função dos parâmetros utilizados para o cálculo do IQA, fica nítida a extrema importância da vegetação na qualidade das águas dos corpos hídricos tanto na ausência, quanto na presença de chuvas. Por sua vez, a vegetação desempenha um papel significativo na melhoria da qualidade da água, atuando como um filtro biológico que remove poluentes e nutrientes em excesso presentes na água. Essa função é

Por meio da Figura 6, pode-se verificar que a primeira componente explicou cerca de 61,3% do agrupamento (ordenação) observada. E está significativamente correlacionada com as variáveis: IQA, OD, pH, de maneira positiva, e negativamente com: P, N, DBO e *E.coli*, tais parâmetros receberam influência da condição climática, além do uso e ocupação da terra.

Essa relação era esperada, uma vez que os esgotos domésticos, caracterizados por possuírem elevadas concentrações de material orgânico (DBO), microrganismos patogênicos como a *E.coli* e nutrientes (N e P) quando lançados nos corpos hídricos resultam no decaimento do oxigênio dissolvido presente no meio aquático devido a degradação aeróbia (VON SPERLING, 1996). Analogamente, em virtude desta decomposição do material orgânico, compostos como ácidos orgânicos são liberados no meio acarretando a redução do pH do meio.

De maneira semelhante, na pesquisa conduzida por Pereira (2016) na Bacia Hidrográfica do Alto Tietê, foi estabelecida uma significativa correlação positiva com as quantidades de nutrientes presentes na água, derivados da presença humana nas áreas circundantes à bacia, evidenciando, assim, a relevância da análise do padrão de utilização e ocupação da terra na qualidade dos corpos d'água.

A segunda componente apresentou uma porcentagem significativa de explicação = 22,5%, e está correlacionada, especialmente, com os parâmetros de turbidez, temperatura e RT. Também recebendo interferência da condição climática (chuva), como do uso e ocupação da terra. A correlação identificada resulta principalmente da carência de vegetação nas regiões adjacentes aos rios, provocando um aumento na carga sedimentar transportada para os corpos d'água durante os eventos pluviométricos, devido à elevada taxa de escoamento superficial. Este fenômeno é primariamente atribuído à intensa atividade humana nessas áreas. (FRITZSON; PARRON. MANTOVANI, 2015). Essa abordagem é corroborada por meio dos estudos realizados por Wittman *et al.* (2013), onde ao avaliar a turbidez da água na Bacia Hidrográfica de Dry Run Crrek, os autores verificaram que havia uma grande variação decorrente das épocas chuvosas.

Portando, as áreas vegetadas atuam de maneira exponencial como filtro na retenção de contaminantes, poluentes e nutrientes no solo fazendo com que os mesmos não atinjam os corpos hídricos, uma vez que as áreas urbanas e agrícolas, facilitam o carreamento destes compostos por meio do escoamento superficial (SWEENEY; NEWBOLD, 2014).

4. CONCLUSÕES

Em áreas vegetadas, maiores valores de IQA são obtidos tanto na ausência quanto na presença de um evento de pluviosidade, cabe destacar ainda que o índice é influenciado pela precipitação, elevando seus valores nos pontos de amostragem na maioria dos pontos amostrados.

Além do IQA, todos os parâmetros de qualidade da água utilizados para o cálculo do índice, exceto o pH sofreram influência significativa dos pontos de amostragem em função dos usos da terra e os parâmetros *E. coli*, pH, N, resíduos totais e turbidez foram influenciados pelas condições climáticas.

Há uma correlação positiva entre os pontos de amostragem localizados nas regiões mais vegetadas com as variáveis IQA, OD, pH, e negativa com P, N, DBO e *E.coli*, onde se encontram os pontos urbanizados, uma vez que esses parâmetros receberam influência da precipitação, assim como, do uso e ocupação da terra. Da mesma maneira, há correlação entre os parâmetros de turbidez, temperatura e resíduos totais com as condições climáticas de amostragem e do uso e ocupação da terra.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALASKA SATELLITE FACILITY. **ASF Search.** Disponível em: <https://search.asf.alaska.edu/>. Acesso em: 20 dez. 2023.

AMINUL ISLAM, M.; MORTON, D. W.; JOHNSON, B. B.; MAINALI, B.; ANGOVE, M. J. Manganese oxides and their application to metal ion and contaminant removal from wastewater. **Journal of Water Process Engineering**, v. 26, p. 264-280, 2018.

APHA, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. **American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environmental Federation**, 23rd. ed. Washington, D.C.: American Public Health Association, 2017.

ARAUJO, I.S.; DORTZBACH, D.; BLAINSKI, E.; BACIC, I. L. Z. Avaliação da qualidade da água em uma microbacia produtora de arroz irrigado em Massaranduba, SC. In: **SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE QUALIDADE AMBIENTAL**, 7., 2010, Porto Alegre. Anais. Porto Alegre: ABES, 2010.

ASCIUTTI, G. A. M.; STANGANINI, F. N.; MELANDA, E. A. Identificação dos diferentes usos e ocupação do solo da bacia hidrográfica do rio do quilombo, São Carlos/SP utilizando imagem do satélite sentinel 2 e o complemento scp do qgis. In: **ANAIS DO XIX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2019**, Santos. Anais eletrônicos. São José dos Campos: INPE, 2019.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. Resolução n. 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília**, n. 53, 17 de março de 2005.

BRASIL. Programa Nacional do Meio Ambiente - PNMA II. Índice e indicadores de qualidade da água: revisão da literatura. Recife: **Ministério do Meio Ambiente**, 2001.

CARMO, M. R. B. A vegetação ripária ao longo do rio Pitangui. Ponta Grossa: **UEPG**, 2010, 73-85 p.

CAVAZZI, S.; CORSTANJE, R.; MAYR, T.; HANNAM, J. & FEALY, R. Are fine resolution digital elevation models always the best choice in digital soil mapping? **Geoderma**, v. 195/196, p. 111-121, 2013.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB. Apêndice D – Índice de Qualidade de Água. In: MARTINS, M. H. R. B. (coord. geral). Qualidade das Águas Interiores no Estado de São Paulo 2018 (Série Relatório). São Paulo: **CETESB**. 32 p., 2019. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/> Acesso em: 2 nov. 2023.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB. Relatório de qualidade das águas superficiais do estado de São Paulo: significado ambiental e sanitário das variáveis de qualidade. São Paulo: **CETESB**, 2014. Disponível em:

<https://aguasinteriores.cetesb.sp.gov.br/wpcontent/uploads/sites/32/2013/11/Ap%C3%AAndic-e-D-Significado-Ambiental-eSanit%C3%A1rio-das-Vari%C3%A1veis-de-Qualidade.pdf>.

CORNELLI, R.; SCHNEIDER, V. E.; BORTOLIN T. A.; SANTOS, G. M. Análise da influência do uso e ocupação do solo na qualidade da água de duas sub-bacias hidrográficas do município de Caxias do Sul. *Scientia cum Industria*, [S. l.], v. 4, n. 1, 2016.

FRITZSONS, E.; PARRON, L. M.; MANTOVANI, L. E. Qualidade da água e o uso e ocupação da terra da bacia de Ribeirão da Onça, Colombo, PR. Colombo: **Embrapa Florestas**, 2015.

HAIR, Jr; BLACK, W. C; BABIN, B. J.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L. Análise Multivariada de Dados. Porto Alegre: **Bookman**, 2005.

HESPANHOL, K. M. H. Monitoramento e diagnóstico da qualidade da água do Ribeirão Morangueiro. 2009. 156f. **Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Maringá, Departamento de Engenharia Civil**, 2009.

Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Relatório Anual de Dados Meteorológicos, 2023. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/dados-meteorologicos>. Acesso em: 15 de jan. de 2024.

LANDS, J. R., KOCH, G. G. The measurement of observe agreement for categorical data. **Biometrics**, v. 31, p. 159–174, 1977.

LIMA, C. R. N.; DORES, E.; CRUZ, I. F.; ZEILHOFER, P. Variabilidade espacial da Qualidade de Água em Escala de Bacias - Rio Cuiabá e São Lourenço, Mato Grosso. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.20, n. 1, p. 169-178, 2015.

MELLO, K. D.; VALENTE, R. A.; RANDHIR, T. O.; SANTOS, A. C. A.; VETTORAZZI, C. A. Effects of land use and land cover on water quality of loworder streams in Southeastern Brazil: Watershed versus riparian zone. **Catena**, v. 167, p. 130-138, 2018.

NILSSON, C., MALM-RENÖFÄLT, B. Linking flow Regime and water quality in rivers: a challenge to adaptive catchment management. **Ecology & Society**, v. 13, n. 2, p. 18, 2008.

OKUMURA, A. T. R.; SILVA, A.; SILVA, N. R. S.; REIS, E.; BIFANO, R. B. A.; QUILENATO, R. V. Determinação da qualidade da água de um rio tropical sob a perspectiva do uso. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 04, p. 1835-1850, 2020.

OLIVEIRA FILHO, A. T.; CARVALHO, W. A. C.; MACHADO, E. L. M.; HIGUCHI, P.; CASTRO, G. C.; SILVA, A. C.; SANTOS, R. M.; BORGES, L. F. R.; CORRÊA, B. S.; ALVES, J. M. Dinâmica da comunidade e populações arbóreas da borda e interior de um remanescente florestal na serra da Mantiqueira, Minas Gerais, em um intervalo de cinco anos: 1999- 2004. **Revista Brasileira de Botânica**, São Paulo, v. 30, n. 1, p. 149-161, 2007.

PEREIRA, R. H. de A. Análise espaço temporal de parâmetros de qualidade de água e sua relação com uso e ocupação na bacia do Alto Tietê. 2016. 105p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Ambiental) – **Universidade Estadual Paulista**, Rio Claro - SP, 2016. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/144007>. Acesso em: 20 dez. 2023.

QGIS DEVELOPMENT TEAM. QGIS Geographic Information System. **Open Source Geospatial Foundation Project**. Disponível em: <http://qgis.osgeo.org>

RSTUDIO TEAM 2020. RStudio. Integrated Development for R. RStudio, PBC, Boston, MA. Disponível em: <http://www.rstudio.com/>.

SILVA, J. M. O. Uso do sensoriamento remoto para a estimativa da temperatura de superfície na microbacia do rio Granjeiro/Crato–Ceará. **Geosaberes**, v. 6, n. 2, p. 130-144, 2015.

SWEENEY, B. W.; NEWBOLD, J. D. Streamside forest buffer width needed to protect stream water quality, habitat, and organisms: a literature review. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 50, n. 3, p. 560-584, 2014.

UNESCO. Conselho Nacional da Reserva da Biosfera da Mata Atlântica. Série Políticas Públicas. Caderno n. 27. 2003.

VAEZA, R. F. et al. Uso e Ocupação do Solo em Bacia Hidrográfica Urbana a Partir de Imagens Orbitais de Alta Resolução. **Floresta e Ambiente**, Rio de Janeiro, v. 17, n. 1, p. 23-29, 2010.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 4. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais, 2014.

VON SPERLING, M. **Noções de qualidade das águas. In: Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos.** 3 ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, 2005.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos.** 2. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais, 1996.

WITTMAN, J. WECKWERTH, A.; WEISS, C.; HEYER, S.; SEIBERT, J.; KUENNEN, B.; INGELS, C.; SEIGLEY, L.; LARSEN, K.; BERLAGE, J. E. Evaluation of land use and water quality in an agricultural watershed in the USA indicates multiple sources of bacterial impairment. **Environmental monitoring and assessment.** v. 185, n. 12, p. 10395-10420, 2013.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). Guidelines for Drinking-water Quality. 4. ed. Geneva: WHO Library, 2011.

YIRIGUI, Y.; LEE, SW; NEJADASHEMI, AP; HERMAN, MR; LEE, JW. Relações entre fragmentação de mata ciliar e indicadores biológicos de riachos. **Sustentabilidade**, Suíça. v. 11, 2019.

CAPÍTULO III – RELAÇÕES ENTRE ECOTOXICOLOGIA DE ÁGUAS FLUVIAS E USO E OCUPAÇÃO DA TERRA

RESUMO

Decorrente do avanço populacional desordenado e da intensificação das atividades antrópicas, diversos são os impactos ambientais resultantes nos corpos hídricos, como por exemplo a toxicidade das suas águas. O presente estudo tem como objetivo avaliar a toxicidade da água do Rio das Antas por meio de bioensaios ecotoxicológicos utilizando neonatos do microcrustáceo *Daphnia magna* e relacionar com o uso e ocupação da terra nas áreas próximas ao rio. Foram adotados 14 pontos de amostragem durante todo o percurso do rio avaliado e posteriormente realizadas coletas de amostras de água, em seguida submetidas a análises de toxicidade aguda por meio da utilização dos neonatos. Foi gerado o mapeamento do uso e ocupação da terra da Bacia Hidrográfica do Rio das Antas e em seguida realizada uma análise de aproximadamente 400 metros de raio a partir de cada ponto de amostragem. Foram quantificadas as taxas de ocupação referentes a cada área avaliada e posteriormente correlacionado esses valores com os dados de toxicidade obtidos. Diante dos resultados, conclui-se com elevada significância (99%) que o uso e ocupação da terra nas áreas ao redor dos corpos hídricos influencia diretamente na toxicidade da água de forma a impactá-lo (áreas urbanas) ou preservá-lo (áreas de floresta nativa) a depender do uso quando avaliada por meio de ensaios agudos utilizando de neonatos do microcrustáceo *Daphnia magna*.

Palavras-chave: biomonitoramento, sensoriamento remoto, *Daphnia magna*.

ABSTRACT

Due to uncontrolled population growth and intensified anthropic activities, numerous environmental impacts occur in water bodies, such as the toxicity of their waters. This study aimed to evaluate the water toxicity of the Antas River through ecotoxicological bioassays using neonates of the microcrustacean *Daphnia magna*, and to relate it to land use and land cover in areas near the river. Fourteen sampling points were selected along the entire assessed stretch of the river, and water samples were collected and subjected to acute toxicity analyses using neonates. Land use and land cover mapping of the Antas River Watershed was generated, and an analysis was conducted within approximately a 400-meter radius from each sampling point. The occupation rates for each evaluated area were quantified and subsequently correlated with the obtained toxicity data. The results revealed a high significance level (99%) indicating that land use and land cover in the vicinity of water bodies directly influence water toxicity, impacting it in urban areas or preserving it in native forest areas, depending on the land use, as assessed through acute assays using neonates of the microcrustacean *Daphnia magna*.

Keywords: biomonitoring, remote sensing, *Daphnia magna*.

HIPOTESE

A hipótese formulada neste capítulo sugere que os neonatos do microcrustáceo da espécie *Daphnia magna* desempenham o papel de indicadores de qualidade da água em rios, dada sua ampla aceitação global na avaliação de águas residuárias.

1. INTRODUÇÃO

Devido ao elevado crescimento e desenvolvimento urbano, nas últimas décadas, as diversas atividades antrópicas têm resultado numa vasta remoção de mata ciliar, despejos de esgotamento sanitário sem seu devido à tratamento e diversos outros impactos ambientais. Com a Floresta Ombrófila Mista, também conhecida como Floresta com Araucária a situação não é diferente, essa tipologia da Floresta Atlântica possui apenas 0,8% dos seus remanescentes naturais em estágio de sucessão avançado, fragmentados entre os três planaltos do estado do Paraná (RIBEIRO *et al.*, 2009). Estes impactos vêm causando um grande desequilíbrio ecológico, ocasionado principalmente devido à deterioração da qualidade das águas nos corpos hídricos, o que resulta numa grande ameaça aos ecossistemas aquáticos ali presentes (LARSON *et al.*, 2019; MENDOZA *et al.*, 2017). Portanto, os poucos remanescentes florestais naturais localizados nas regiões mais urbanizadas são transformados com grande intensidade e frequência com o intuito de “beneficiar” a sociedade, porém, os tornam como um dos principais fatores que influenciam na elevada degradação hídrica nessas regiões (URIARTE *et al.*, 2011, SU *et al.*, 2016).

Esse tipo de ocasião é comumente encontrado em municípios considerados de pequeno porte os quais se encontram em pleno crescimento e desenvolvimento econômico e que possuem corpos hídricos urbanos de pequenas vazões. Atrelado a urbanização, cabe destacar que outros usos da terra impactam de forma direta ou indireta na qualidade e na toxicidade dos corpos hídricos, como por exemplo as atividades relacionadas a agricultura e as pastagens quando não geridas de forma correta. Um exemplo disso é o município de Irati localizado no estado do Paraná na região Sul do Brasil, a qual tem como seu principal corpo hídrico o Rio das Antas e o tipo de vegetação do ecossistema pertencente a cidade é denominada de Floresta Ombrófila Mista (ANDRADE; FELCHAK, 2009). Entretanto, suas vegetações são cada vez mais suprimidas decorrentes da urbanização o que afeta diretamente nas características da água do rio principal da bacia hidrográfica. Pois, segundo Von Sperling (2005), a vegetação serve como barreira para proteção das águas nesses locais, evitando que haja alterações na qualidade e na toxicidade das mesmas.

Os principais impactos ambientais nos corpos hídricos advindos da ausência de uma Área de Preservação Permanente (APP) são decorrentes do aumento do teor de sólidos

ocasionando em elevados teores de cor e turbidez reduzindo a zona eufótica, assim como o assoreamento dos seus leitos e o aumento nas concentrações de nutrientes (nitrogênio e fósforo), material orgânico e de microrganismos patogênicos advindos do lançamento de esgoto doméstico *in natura* (OLIVEIRA-FILHO *et al.*, 2007). Portanto, torna-se imprescindível a realização de biomonitoramentos ecotoxicológicos nessas regiões devido aos diversos impactos os quais esses ambientes são submetidos.

Ao considerar os diversos efeitos nocivos causados por substâncias químicas oriundas da poluição hídrica aos seres vivos, esses organismos apresentam uma resposta de acordo com as reações oriundas das perturbações no meio, ocasionando em efeitos diretos ou indiretos (KNIE & LOPES, 2004). Em alguns tipos de organismos, o impacto é verificado com grande facilidade, portanto, tornando-os como sensores biológicos devido a sua sensibilidade à alterações ambientais, gerando efeitos agudos ou crônicos, como por exemplo a morte e/ou algumas mudanças fisiológicas (ZAGATO & BERTOLETTI, 2006). Dentre os microrganismos utilizados para detecção da toxicidade do meio aquático destacam-se os microcrustáceos, tendo como exemplo, a *Daphnia magna*. Essa espécie de *Daphnia* é considerada uma das mais utilizadas na realização de análises ecotoxicológicas devido a apresentar um rápido crescimento e uma produtividade elevada, assim como, curtos ciclos de vida e sensibilidade significativa a alterações do meio com a presença de contaminantes (MARTINS, TELES, VASCONCELOS, 2007). Entretanto, o uso destes microrganismos como indicadores de toxicidade em águas fluviais é escasso, havendo poucos estudos relacionados a essa temática.

Decorrente das consequências do avanço humano nas áreas de preservação permanente, a aplicação de técnicas de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) podem ser utilizadas como ferramentas de extrema importância no monitoramento e nas mudanças do uso e ocupação da terra de forma mais fácil e ágil, com o intuito de frear a poluição e a contaminação dos cursos hídricos urbanos. Todavia, diversos estudos são desenvolvidos com o intuito de estabelecer relações as quais comprovam a deterioração na qualidade das águas devido a intensificação das atividades antrópicas em função do uso da terra em uma bacia ou sub-bacia hidrográfica (MELO *et al.*, 2020; DALA-CORTE *et al.* 2020; HUNT *et al.*, 2017; CASTRO *et al.* 2018).

Nesse contexto, uma análise de caracterização toxicológica dos corpos hídricos impactados ambientalmente torna-se de extrema importância, tendo em vista que as águas

pertencentes a eles podem posteriormente serem captadas e tratadas com a finalidade de abastecimento a populações. Sendo assim, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a toxicidade da água do Rio das Antas por meio de bioensaios ecotoxicológicos utilizando de neonatos do microcrustáceo *Daphnia magna* em função do uso e ocupação da terra nas áreas próximas ao rio.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Descrição da área de estudo

A área de estudo da presente pesquisa é denominada de Bacia Hidrográfica do Rio das Antas, esta está localizada nos municípios de Irati, Imbituva e Fernandes Pinheiro no estado do Paraná, na região Sudeste do estado. A bacia hidrográfica do Rio das Antas faz parte do conjunto de sub-bacias as quais constituem a Bacia Hidrográfica do Rio Tibagi. A região possui uma temperatura média variando entre 11,0° C no mês de junho (períodos mais frios) e 24,2° C em janeiro (períodos mais quentes), sendo que nos meses mais secos as precipitações médias ficam em torno de 4 mm e nos meses mais chuvosos essa média atinge cerca de 175 mm (IAPAR, 2018). A área da bacia em estudo está localizada na Mata Atlântica, em uma região fitoecológica considerada como Floresta Ombrófila Mista, mais precisamente na região de coleta dos pontos de amostragem essa tipologia é caracterizada como Floresta Ombrófila Aluvial devido a presença do corpo hídrico e as suas respectivas áreas de várzea.

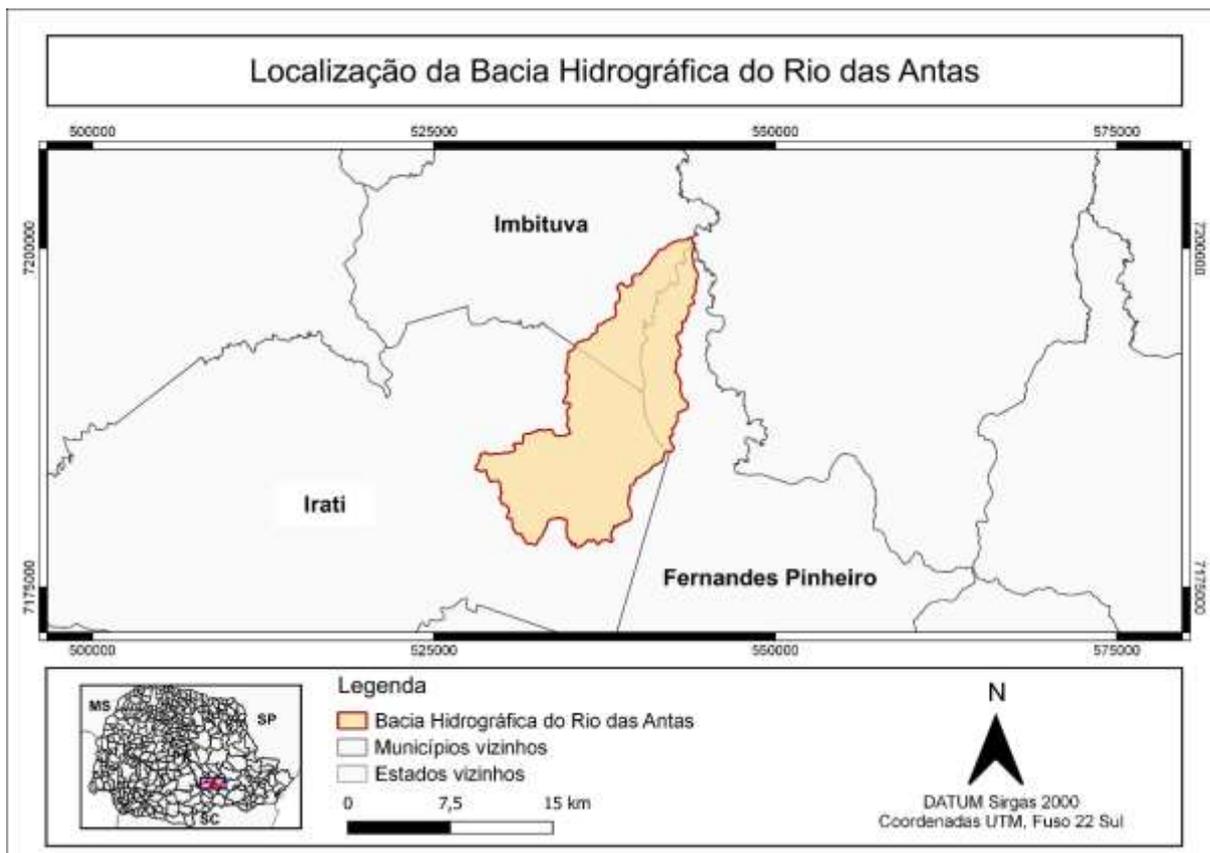
A bacia hidrográfica estudo, tem como seu principal afluente o Rio das Antas, este possui cerca de 80 km de extensão e segundo a Resolução CONAMA 357/2005 a qual classifica os corpos hídricos do território brasileiro é categorizado como Classe 2, portanto, segundo esta resolução, possui uma qualidade da água consideravelmente boa. O Rio das Antas possui a maior parte do seu curso no município de Irati, nasce na serra do bairro Nhapindazal em uma região com grande predominância de áreas agrícolas, percorrendo em sua maior extensão pela área urbana do município, cidade a qual o tem como principal corpo hídrico. Posteriormente é

desaguado no Rio Imbituvão onde encontra-se a sua foz, local esse caracterizado por apresentar uma preservação ambiental bem expressiva decorrente da presença da Floresta Nacional de Irati (ANDRADE; FELCHAK, 2009).

2.2 Adoção dos pontos de amostragem e coleta das amostras

Para a adoção dos pontos de amostragem das coletas das amostras de água do Rio das Antas, foram considerados alguns fatores, como por exemplo, a localização de indústrias, da estação de tratamento de esgotos (ETE), habitações residenciais, áreas de cultivo agrícola, pastagem, reflorestamento e matas nativas próximas ao corpo hídrico. Além da adoção dos pontos de acordo com os usos da terra citados, também foi considerado a disponibilidade da entrada nas propriedades privadas como residências, chácaras, empresas e fazendas, assim como, a facilidade do acesso ao corpo hídrico.

Foram adotados 14 pontos de amostragem desde a nascente do rio (Ponto 1) até a foz (Ponto 14), número este escolhido de acordo com o posicionamento dos usos citados anteriormente, assim como, levando em conta que pontos muito próximos não teriam grandes diferenças na realização dos ensaios de toxicidade decorrente da dinâmica natural do rio. Outro fator levado em conta na adoção deste número de amostras, é devido ao fato de que as coletas deveriam ser realizadas todas no mesmo dia e as análises laboratoriais em no máximo 24 horas após as mesmas, para que fosse possível realizar a comparação dos dados obtidos e que as amostras não sofressem interferências externas. Sendo assim, o deslocamento e a coleta de mais amostras se tornariam inviáveis de acordo com as condições de tempo a serem seguidas e as dificuldades encontradas para acessar o corpo hídrico. A localização geográfica da Bacia Hidrográfica do Rio das Antas está apresentada na Figura 1.



Fonte: O Autor, 2024.

Figura 1. Localização geográfica da Bacia Hidrográfica do Rio das Antas.

Para a realização das coletas das amostras, adotou-se a condição de não haver chuva na área da Bacia Hidrográfica do Rio das Antas em pelo menos 7 dias consecutivos para que não houvesse interferência na qualidade da água. As amostras foram coletadas em três diferentes seções superficiais do rio, nas duas laterais e no centro, e posteriormente homogeneizadas, resultando em uma amostragem composta.

2.3 Análises de ecotoxicidade da água do Rio das Antas

As amostras de água do Rio das Antas após serem coletadas em seus respectivos pontos de amostragem, em um prazo máximo de 24 horas foram submetidas as análises. Com a finalidade de verificar a toxicidade aguda das amostras coletadas, foram realizadas análises por

meio da utilização de neonatos do microcrustáceo *Daphnia magna*, tendo vista que esses microrganismos se caracterizam por apresentarem expressiva sensibilidade a poluição ambiental.

Para realização dos ensaios, adotou-se as normativas adaptadas dispostas na NBR 12.713 de 01/2022, onde foi utilizado 5 neonatos de *Daphnias magna* com cerca de 2 à 26 horas de vida, os crustáceos foram alocados em béqueres contendo 50 ml de amostra de cada ponto avaliado e permaneceram por um período de 48 horas. As análises ocorreram em triplicata e não foram realizadas diluições das amostras, tendo em vista que as mesmas eram coletadas de um corpo hídrico. Considerou-se como efeito tóxico as amostras que diferiram estatisticamente do controle negativo.

As leituras das análises foram efetuadas de forma criteriosa identificando a lentidão, imobilização, morte ou a alternância no comportamento dos crustáceos após 24 horas e 48 horas de ensaio. Para fins de veracidade e confiabilidade dos dados, foram realizadas além das análises contendo as amostras coletadas nos pontos avaliados, as análises de controle positivo, onde o meio o qual recebeu as *Daphnias* possui toxicidade e todos os neonatos são afetados, assim como o controle negativo, onde não há interferência nenhuma, portanto, o meio foi composto de água destilada.

2.4 Avaliação do uso e ocupação da terra na bacia hidrográfica do Rio das Antas

Para a realização da avaliação do uso e ocupação da terra na Bacia Hidrográfica do Rio das Antas e a análise de proximidade dos pontos, efetuou-se primeiramente a delimitação da mesma de acordo com os seus divisores de água (pontos de maiores altitudes) e do seu afluente principal utilizando o *software QGIS versão 3.12.3* com o auxílio da ferramenta de vetores. A vetorização foi realizada com base na carta geográfica da região disponível na base cartográfica do Instituto Terras, Cartografia e Geologia do Paraná (ITCG) fornecida pelo Instituto Água e Terra (IAT). A carta escolhida (nº 2839-4) possui uma escala de 1:50.000, onde cada um centímetro da carta representa 50.000 centímetros no terreno e uma resolução de escanerização de 300 *dpi*. Para a realização da escolha da referida carta, levou-se em conta sua abrangência tendo em vista que a área de estudo se enquadra dentro da mesma. Em ambas as camadas

vetoriais criadas, foi utilizado o Sistema de Referências Cartográfica (SRC) com EPSG: 31982 – SIRGAS 2000 / UTM zone 22S.

A coleta dos dados utilizados para a realização do mapa de uso e ocupação da terra foi feita por meio do *download* das imagens disponíveis na plataforma digital do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). O satélite utilizado para aquisição dos mesmos foi o CBERS4AWPM o qual possui uma resolução de 8 metros. Realizou-se a busca pelos bancos de dados num período de um ano (de janeiro de 2022 a janeiro de 2023) na região da área de estudo. Posteriormente a localização das imagens mais representativas, efetuou-se o *download* das mesmas com as bandas do azul, vermelho, verde e infravermelho.

Após a obtenção das imagens da área de estudo com as bandas supracitadas, por meio do *software QGIS versão 3.12.3* realizou-se o georreferenciamento e o recorte das mesmas em função da área desejada (B.H. do Rio das Antas) por meio da função “*extrair raster pela camada de máscara*” em lote. O SRC do produto gerado desta extração foi o mesmo dos demais projetos relacionados a esta pesquisa, o EPSG: 31982 – SIRGAS 2000 / UTM zone 22S. Após o recorte, realizou-se a mesclagem das camadas rasters, originando como produto uma nova camada resultante.

Por meio do complemento “*Semi-Automatic Classification*” do *software* já citado, na função “*SCP dock*”, foi realizada a classificação supervisionada do uso e ocupação da terra com a utilização de 50 amostras de cada tipo de uso, os quais foram divididos em floresta nativa, reflorestamento, pastagem, solo exposto, área urbana e agricultura. Para a realização da coleta das amostras, foram efetuados formatos geométricos livres sobre a área da bacia em regiões onde se encontravam os pré-determinados usos avaliados. Posteriormente a realização da coleta das amostras e adoção de cores para determinado uso, utilizou-se da função “*band processing - classification*” através do algoritmo “*maximum likelihood*”, ou seja, a semelhança máxima entre os pontos para gerar a classificação supervisionada.

Em seguida a obtenção do mapeamento dos usos da terra, delimitou-se um *buffer* contendo um raio de 400 metros a partir de cada um dos pontos de amostragem adotados e realizou-se o recorte da área. Os critérios utilizados na determinação do raio para criação dos *buffers* foram em função da escala dos usos da terra presentes na bacia, tendo em vista que mudanças na qualidade da água dos corpos hídricos até 500 metros de distância podem comprometer a comunidade aquática dos mesmos (YIRIGUI *et al.*, 2019; FRIEDEN *et al.*,

2014). Após a geração dos *buffers* com suas respectivas classes de uso e ocupação de terra, por meio da ferramenta de processamento “*r.report*”, calculou-se a área ocupada por cada uso dentro da região avaliada em cada ponto e suas respectivas porcentagens em função da área total do *buffer*.

Com a finalidade de avaliar a acurácia da classificação do uso e ocupação da terra gerada na área de estudo, foi calculado o Índice Kappa (K) por meio da Equação 1.

$$K = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^y x_{ii} - \sum_{i=1}^y (x_{i+} \cdot x_{i+})}{n^2 - \sum_{i=1}^y (x_{i+} \cdot x_{i+})} \quad \text{(Equação 1)}$$

Em que:

$\sum_{i=1}^y x_{ii}$ = a soma da diagonal da matriz de confusão;

n = o número total de amostras que representam o uso e ocupação da terra e da cobertura observado no campo;

x_{i+} = a soma das linhas da matriz de confusão;

x_{+i} = a soma das colunas da matriz de confusão.

Posteriormente, realizou-se a interpretação do valor obtido para Kappa obtido da área de estudo de acordo com a classificação disposta por Landis e Koch (1977), de acordo com as classes apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Classificação dos valores do índice Kappa para a classificação do uso e ocupação da terra.

Valores de Kappa	Classificação
< 0	Péssima
0,00 – 0,019	Ruim
0,20 – 0,39	Razoável
0,40 – 0,59	Boa
0,60 – 0,79	Ótima
0,80 – 1,0	Excelente

Fonte: Landis e Koch (1977)

2.5 Análise estatística dos dados

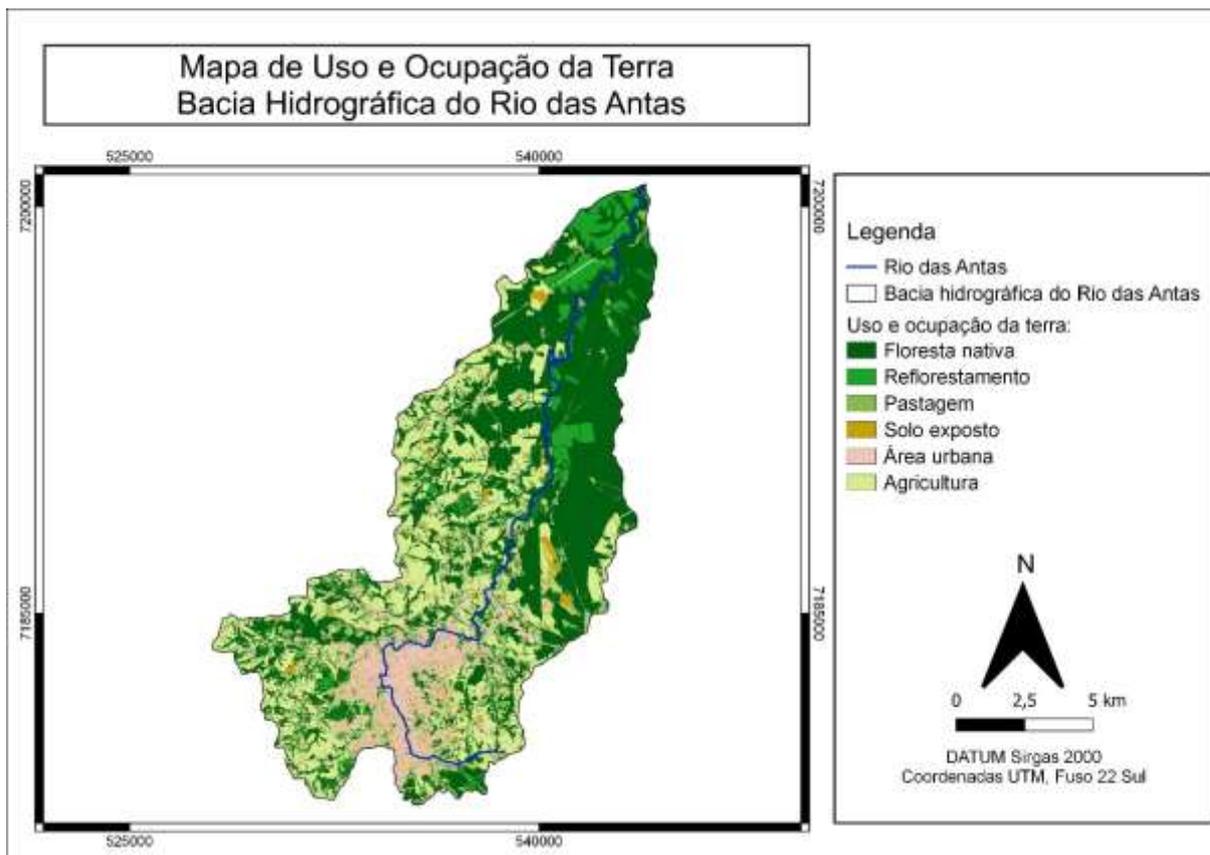
Com o intuito de testar a hipótese de que o uso e ocupação da terra, no entorno das unidades amostrais (14 pontos), interfere significativamente na toxicidade das águas superficiais os dados de uso e ocupação da terra (quantitativos contínuos – %) e de toxicidade (qualitativos: Tóxico e Não tóxico), foram submetidos a técnica multivariada denominada análise de agrupamento ou *cluster analysis*, cujo principal objetivo é agrupar objetos a partir de suas características (HAIR *et al.* 2005). No presente estudo utilizou-se o método de agrupamento particional com o algoritmo k-means que se baseia em centroides.

Para verificar se os agrupamentos formados correspondem significativamente aos pontos não tóxicos e tóxicos, os grupos encontrados foram associados à toxicidade (Tóxico e Não tóxico), e contrastados pelo teste “t”. O nível de significância, para todas as análises foi de 5%. Para verificar os pressupostos de normalidade, empregou-se o teste de Anderson Darling, e para o de homogeneidade de variâncias aplicou-se o teste de Fligner-Killeen. O resultado é expresso pelo valor “p” (um valor <0.05 indica que há diferença estatística). As análises foram feitas com o *software* RStudio, versão 4.0.2, pacotes MASS, *cluster* e ggplot2 (RStudio, 2020).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Avaliação do uso e ocupação da terra

A partir do mapeamento do uso e ocupação da terra da Bacia hidrográfica do Rio das Antas, obteve-se a distribuição dos usos os quais estão apresentados na Figura 2.

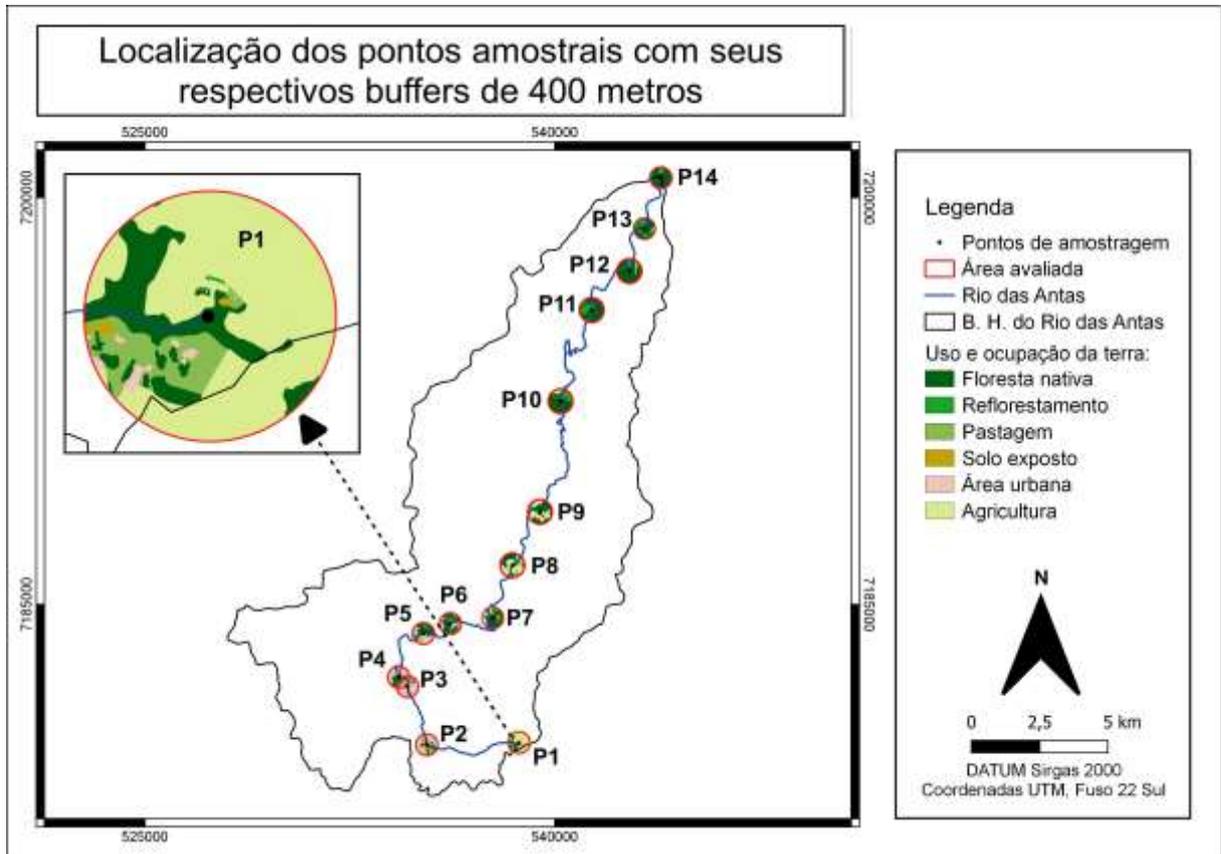


Fonte: O Autor, 2024.

Figura 2. Mapeamento do uso e ocupação da terra na Bacia Hidrográfica do Rio das Antas.

A bacia hidrográfica do presente estudo tem como principal uso da terra dentre os avaliados a predominância de florestas nativas, totalizando cerca de 46,31%, seguido de áreas de agriculturas, urbanas, reforestamentos, pastagens e solos expostos, contendo 25,67%, 13,42%, 6,48%, 5,42% e 2,67%, respectivamente, totalizando uma área total da bacia de 167,82 Km². Os valores das porcentagens são consideráveis tendo em vista que Dariva (2021), ao avaliar o uso e ocupação da terra nesta mesma bacia hidrográfica obteve uma composição de 46% de mata nativa nesta região, um total de 33% somando os usos relacionados a agricultura e solo exposto, 11% referente as áreas de reforestamento e cerca de 9% ao considerar a área urbana. Nota-se certa variância em parte das porcentagens obtidas o que é explicado devido as diferentes ferramentas de SIG utilizadas e do crescimento das regiões antropizadas no município que está em pleno desenvolvimento.

Após a obtenção do mapeamento dos usos da bacia, realizou-se os recortes dos *buffers* em função dos seus respectivos pontos de amostragem como apresentado na Figura 3.



Fonte: O Autor, 2024.

Figura 3. Localização dos pontos de amostragem da água do Rio das Antas e seus respectivos *buffers* de 400 metros.

Posteriormente a realização dos cálculos das áreas pertencentes a cada uso da terra nos *buffers* para os pontos de amostragem avaliados, foram obtidos os dados apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Porcentagem de cada uso e ocupação da terra avaliado em seus respectivos *buffers* dos pontos de amostragem adotados.

Porcentagem dos usos e ocupação da terra (%)						
Pontos	Floresta nativa	Reflorestamento	Pastagem	Solo exposto	Agricultura	Área urbanizada
Ponto 1	20,02	0,17	11,18	0,65	66,14	1,82
Ponto 2	6,59	0	9,39	3,11	0	80,90
Ponto 3	15,81	0	4,51	2,25	0	77,42
Ponto 4	24,57	0	4,84	3,82	0	66,74
Ponto 5	32,93	0	10,38	1,03	0	55,63
Ponto 6	46,83	0	6,44	3,19	0,66	42,85
Ponto 7	52,14	5,07	8,08	13,65	9,25	5,64
Ponto 8	42,22	2,03	11,13	0,32	39,63	2,60
Ponto 9	71,50	0	1,27	0,96	23,67	2,57
Ponto 10	76,84	13,75	5,66	0	3,73	0
Ponto 11	80,12	19,87	0	0	0	0
Ponto 12	82,28	3,67	14,03	0	0	0
Ponto 13	62,87	18,08	19,04	0	0	0
Ponto 14	82,99	10,43	6,56	0	0	0

Fonte: o Autor, 2024.

Por meio dos dados apresentados, nota-se uma elevada porcentagem de área urbanizada nos pontos 2, 3, 4, 5 e 6, onde este tipo de uso da terra compõem mais de 40% das áreas avaliadas, enfatizando o ponto de amostragem 2 o qual possui cerca de 80,90% do seu território pertencente a essa classe. Esses pontos levantados são pertencentes as áreas urbanas do município de Irati, portanto, poucos remanescentes florestais são encontrados nessa região, ou seja, o avanço antrópico é intenso, assim como, poucas áreas de reflorestamento, pastagem, solo exposto e agricultura.

Quando analisado os pontos 1 (nascente), 8 e 9, verifica-se uma considerável presença de agricultura nessas regiões o que é explicado devido as localizações desses pontos, ou seja, nas regiões mais externas do centro urbano. Cabe destacar que o ponto 7 é caracterizado por possuir uma grande variabilidade dos usos, porém, o seu principal enfoque é a presença da estação de tratamento de esgotos a qual lança seus efluentes tratados no rio avaliado.

Em contrapartida aos demais, os pontos 10, 11, 12, 13 e 14 (fz) pertencem a uma área de intensa preservação localizada na Floresta Nacional (FLONA) de Irati o que explica as elevadas porcentagens de floresta nativa nestas regiões. A FLONA de Irati, é considerada como um dos principais remanescentes florestais com a presença de araucárias na região e está localizada nas proximidades da Reserva Biológica das Araucárias e da Estação Ecológica de Fernandes Pinheiro (GRISE *et al.*, 2009; BRASIL, 2000). Porém, essas unidades apresentam

diversos problemas principalmente oriundos de desocupação, tendo em vista que as mesmas devem se manter de forma não antropizada e intactas de degradações ambientais (MANARIM, 2008).

Após o processo de validação, foi constatado que a classificação realizada está em conformidade com as características da área de estudo, refletindo um alto grau de concordância com um Índice Kappa de 0,8185. Esse índice, considerado elevado, sugere que a classificação do uso e ocupação da terra alcançou um desempenho excelente, conforme estabelecido por Lands e Koch (1997).

3.2 Avaliação ecotoxicológica das amostras em função do uso e ocupação da terra

Os pontos de amostragem dividiram-se em tóxicos e não tóxicos ($F_{14;30} = 7,57$ $p < 0.01$), conforme teste de médias, uma vez que os pontos 2, 3, 5, 6, e 7 ficaram estatisticamente iguais ao controle positivo (dicromato de potássio – *daphinias* imobilizadas ou mortas) e os demais pontos 1, 4, 8, 9, 10, 11, 12, 13 e 14 diferiram do controle. Os dados estão apresentados na Tabela 3, uma vez que as médias seguidas das mesmas letras não deferem estatisticamente.

Tabela 3. Teste de médias aplicado aos pontos de amostragem em função dos dados de ecotoxicidade em relação ao número de indivíduos imóveis.

<i>Pontos</i>	P1	P14	P13	P4	P12	P11	P10	P9	P8	P6	P5	P3	P2	P7	CT
<i>Imóveis</i>	0	1	1	1	1	1	1	1	1	4,3	4,3	4,3	5	5	5
<i>Grupos</i>	c	c	c	c	c	c	c	c	c	ab	ab	ab	ab	ab	a

Fonte: o Autor, 2024.

A partir dos dados obtidos em função das porcentagens de cada uso avaliado nos pontos de amostragem juntamente com os resultados das análises de ecotoxicidade utilizando os neonatos, foi realizado o tratamento estatístico dos dados. Ao realizar a análise de agrupamento, foram determinados dois conjuntos de dados (*clusters*), representados, de forma geral, pelos pontos discriminados no teste de toxicidade com as *Daphinias* como não tóxicos (*cluster 1*) e tóxicos (*cluster 2*) como apresentado na Tabela 4.

Tabela 4. Componentes dos grupos gerados na análise de agrupamento a partir da matriz de dados das variáveis de uso e ocupação da terra e toxicidade de 14 unidades amostrais localizadas ao longo do Rio das Antas em Irati- Paraná.

Pontos de amostragem	Cluster	Toxicidade
1	1	Não tóxico
2	2	Tóxico
3	2	Tóxico
4	1	Não tóxico
5	2	Tóxico
6	2	Tóxico
7	2	Tóxico
8	1	Não tóxico
9	1	Não tóxico
10	1	Não tóxico
11	1	Não tóxico
12	1	Não tóxico
13	1	Não tóxico
14	1	Não tóxico

Fonte: o Autor, 2024.

Todavia, nota-se que os pontos de amostragem localizados nas regiões que apresentam maiores porcentagens de área urbanizada (pontos 2, 3, 5, 6 e 7) são considerados como tóxicos segundo o agrupamento estatístico em função das análises ecotoxicológicas, em exceção o ponto 4 o qual apesar de estar situado em uma área urbana, possui uma quantia significativa de mata nativa. Segundo Metzger *et al.*, (2019), isso mostra tamanha importância para a proteção da qualidade da água principalmente se tratando de rios urbanos, enfatizando a relevância e importância das áreas de preservação permanente.

Quando avaliado os pontos 10, 11, 12, 13 e 14 os quais possuem as maiores porcentagens de áreas de floresta nativa e preservadas, não é constatado ecotoxicidade nas amostras. Portanto, essa configuração contribui de forma significativa para preservação dos ecossistemas terrestres e aquáticos o que facilita a manutenção dos mesmos (GRISE *et al.*, 2009). Portanto, diversos estudos foram realizados também em áreas de Mata Atlântica (GERHARD; VERDADE, 2016; TERRA *et al.*, 2015;) reforçando a importância da cobertura florestal em toda a bacia hidrográfica, principalmente nas matas ciliares.

O uso e ocupação da terra também foi fator determinante para a formação dos agrupamentos encontrados, uma vez que no *cluster* um (Não tóxico), predominaram significativamente as áreas com maior cobertura de floresta, reflorestamento e menor porcentagem de solo exposto e área urbana. Importante ressaltar que a pastagem não demonstrou influência significativa na formação dos agrupamentos, portanto, não influenciou na toxicidade da água analisada (Tabela 5).

Tabela 5. Médias e valores do teste t para os diferentes agrupamentos encontrados na matriz de dados do uso e ocupação da terra e toxicidade do Rio das Antas em Irati no Paraná.

Variáveis	Cluster 1	Cluster 2	Teste t	p
Toxicidade*	Não tóxico	Tóxico	10.37	p < 0.01
Floresta (%)	64.85841	29.81575	3,13	p < 0.01
Reflorestamento (%)	8,505	0.845865	2.24	p = 0.04
Pastagem (%)	8.613279	7.280022	0.48	p = 0.64
Solo exposto (%)	0.242277	4.512597	2.66	p = 0.64
Área urbana (%)	0.8764	54.86871	5.54	p < 0.01

* teste do qui-quadrado

Fonte: o Autor, 2024.

Ao analisar a Tabela 5, é verificado alta significância ($p < 0,01$) na atuação da área urbana, assim como das áreas de floresta nativa na toxicidade dos pontos amostrados, porém de maneiras opostas, de forma a prover toxicidade nas regiões urbanizadas e de isentá-las em ambientes preservados. Entretanto, ao verificar os valores obtidos no teste t, é notória a maior influência da área urbana na toxicidade entre ambas (5,54), ou seja, a ação antrópica atua de forma ainda mais intensa na degradação em comparação a proteção pelas áreas de florestas nativas. Portanto, a influência do uso e ocupação da terra na qualidade da água é ainda mais expressiva decorrente da ausência de vegetação nas áreas de preservação permanente (DALACORTE *et al.*, 2020).

A toxicidade apresentada em alguns pontos de amostragem do Rio das Antas no presente estudo é em função da sua perda de qualidade da água. Isso acontece em função dos diversos problemas relacionados a ocupação desordenada na bacia hidrográfica, ausência das áreas de preservação permanente, ao assoreamento do leito do rio, processos de dragagem e redução de

sinuosidade e ainda devido a presença de esgotos sanitários e resíduos sólidos no seu curso o que é corroborado por Andrade e Felchak (2009). Essa perda de qualidade da água decorrente das ações antrópicas associadas a supressão da vegetação é também comprovada por outros autores (SILVA *et al.*, 2016; CÂNDIDO *et al.*, 2015).

Sieklicki *et al.*, (2018) ao avaliar os efeitos toxicológicos da água do Rio das Antas em função do uso e ocupação da terra por meio de ensaios genotóxicos utilizando bioindicadores vegetais (*Allium cepa*), os autores concluíram existir forte influência da área urbanizada nas anormalidades cromossômicas dos vegetais devido a degradação das áreas de preservação permanente. Isso corrobora os resultados apresentados no presente estudo utilizando outro tipo de ensaio, os microcrustáceos (*Daphnia magna*).

4. CONCLUSÕES

Por meio dos fatos apresentados, conclui-se com elevada significância (99%) que o uso e ocupação da terra nas áreas ao redor dos corpos hídricos influencia diretamente na toxicidade da água de forma a impactá-lo ou preservá-lo a depender do uso quando avaliada por meio de ensaios utilizando de neonatos do microcrustáceo *Daphnia magna*. De maneira mais expressiva, os usos os quais possuem maior atuação na toxicidade da água do Rio das Antas são as áreas urbanas seguidas das áreas de floresta nativa, o que é comprovado por meio do teste t em função dos agrupamentos gerados.

Portanto, verifica-se uma notória interferência antrópica maléfica no ecossistema do ambiente aquático avaliado, assim como, um papel fundamental das APPs na conservação e preservação da qualidade dos cursos hídricos.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. NBR 12713. NBR 12713: **Ecotoxicologia aquática** — Toxicidade aguda — Método de ensaio com *Daphnia spp* (Crustacea, Cladocera). Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ANDRADE, A. P.; FELCHAK, I. M. A poluição urbana e o impacto na qualidade da água do Rio das Antas – Irati-PR. **Geoambiente**. v. 12, p. 108-132, 2009.

APHA, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. **American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environmental Federation**, 23rd. ed. Washington, D.C.: American Public Health Association, 2017.

BRASIL. Lei Federal nº 9.985, de 18 de julho de 2000. Regulamenta o artigo 225, § 1º, incisos I, II, III e VII da Constituição Federal, institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, 19 jul. 2000.

BRASIL. **Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. Resolução n. 357, de 17 de março de 2005**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, n. 53, 17 de março de 2005.

CÂNDIDO TS; MIRANDA, JH; ABREU, MVS; QUARTAROLI, L. Avaliação da qualidade da água por meio de parâmetros físico-químicos e influência do uso e ocupação do solo. **Científica Univiçosa**, v. 7, n. 1, p. 329-334, 2015.

CASTRO, D. M. P.; DOLÉDEC, S.; CALLISTO, M. Land cover disturbance homogenizes aquatic insect functional structure in neotropical savanna streams, **Ecological Indicators**, v. 84, p. 573-582, 2018.

DALA-CORTE, R. B.; MELO, A. S.; SIQUEIRA, T.; BINI, L. M.; MARTINS, R. T.; CUNICO, A. M.; PES, A. M.; MAGALHÃES, A. L. B.; GODOY, B. S.; LEAL, C. G.; MONTEIRO-JÚNIOR, C. S.; STENERT, C.; CASTRO, D. M. P.; MACEDO, D. R.; LIMA, D.; GUBIANI, É. A.; MASSARIOL, F.C.; TERESA, F. B.; BECKER, F. G.; SOUZA, F. N.;

VALENTE-NETO, F.; DE SOUZA, F. L.; SALLES, F. F.; BREJÃO, G. L.; BRITO, J. G.; VITULE, J. R. S.; SIMIÃO-FERREIRA, J.; DIAS-SILVA, K.; ALBUQUERQUE, L.; JUEN, L.; MALTCHIK, L.; CASATTI, L.; MONTAG, L.; RODRIGUES, M. E.; CALLISTO, M.; NOGUEIRA, M. A. M.; DOS SANTOS, M. R.; HAMADA, N.; PAMPLIN, P. A. Z.; POMPEU, P. S.; LEITÃO, R. P.; RUARO, R.; MARIANO, R.; COUCEIRO, S. R. M.; ABILHOA, V.; OLIVEIRA, V. C.; SHIMANO, Y.; MORETTO, Y.; SUAREZ, Y. R.; DE O. ROQUE, F., Thresholds of freshwater biodiversity in response to riparian vegetation loss in the Neotropical region. **Journal of Applied Ecology**, v. 57, p. 1391-1402, 2020.

DARIVA, C. M. Influência do uso e ocupação da terra sobre os macroinvertebrados aquáticos e a qualidade da água na bacia hidrográfica do Rio das Antas, IRATI-PR. 72 p. **Dissertação (Mestrado em engenharia Sanitária e Ambiental) – Universidade Estadual do Centro-Oeste**, Irati, 2021.

GERHARD, P.; VERDADE, L. M.; Stream fish diversity in an agricultural landscape of southeastern Brazil. **Biodiversity in Agricultural Landscapes of Southeastern Brazil**. Berlin: De Gruyter, 2016. p. 206-224.

GRISE, M. M.; BIONDI, D.; LINGNAU, C.; ARAKI, H. A. Estrutura da Paisagem do Mosaico Formado Pelas Unidades de Conservação Presentes no Litoral Norte do Paraná. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 39, n. 4, p. 723-742, 2009.

HAIR, Jr; BLACK, W. C; BABIN, B. J.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L. **Análise Multivariada de Dados**. Porto Alegre: Bookman, 2005.

HUNT, L.; MARROCHI, N.; BONETTO, C.; LIESS, M.; BUSS, D. F.; VIEIRA DA SILVA, C., CHIU, M-C.; RESH, V. H. Do Riparian Buffers Protect Stream Invertebrate Communities in South American Atlantic Forest Agricultural Areas? **Environmental Management**, v. 60, p. 1155-1170, 2017.

IAPAR. **Climate charts from Paraná**. 2018. Disponível em: <http://www.iapar.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=677>. Acesso: 15 jun. 2023.

IBGE - INSTITUO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Brasileiro de 2010**.

KNIE, J. L. W. ; LOPES, E. W. B. **Testes ecotoxicológicos: Métodos, Técnicas e Aplicações**. Florianópolis: FATMA/GTZ, 2004. 288p.

LANDS, J. R., KOCH, G. G. The measurement of observe agreement for categorical data. **Biometrics**, v. 31, p. 159–174, 1977.

LARSON, D. M.; DODDS, W. K.; VEACH, A.M. A remoção da vegetação ribeirinha lenhosa alterou substancialmente um ecossistema de córrego em uma bacia hidrográfica de pastagem não perturbada. **Ecosistemas**, v. 22, p. 64-76, 2019.

MANARIM, S. K. Desapropriação para a criação de Unidade de Conservação: um estudo de caso da implantação do Parque Nacional dos Campos Gerais. 147 p. **Dissertação (Mestrado em Ciências Sociais Aplicadas) – Universidade Estadual de Ponta Grossa**, Ponta Grossa, 2008.

MARTINS, J.; TELES, O.; VASCONCELOS, V., Assays with *Daphnia magna* and *Danio rerio* as alert systems in aquatic toxicology, **Environment International**, v. 33, p. 414-425, 2007.

MELLO, K.; TANIWAKI, R.H.; PAULA, F. R.; VALENTE, R. A.; RANDHIR, T. O.; MACEDO, D. R.; LEAL, C. G.; RODRIGUES, C. B.; HUGHES, R. M. Multiscale land use impacts on water quality: Assessment, planning, and future perspectives in Brazil, **Journal of Environmental Management**, v. 270, p. 1-16, 2020.

MENDOZA, G.; TRAUNSPURGER, W.; PALOMO, A.; CATALAN, J. Nematode distributions as spatial null models for macroinvertebrate species richness across environmental gradients: a case from mountain lakes. **Ecology and Evolution**, v. 7, n. 9, p. 3016-3028, 2017.

OLIVEIRA FILHO, A. T.; CARVALHO, W. A. C.; MACHADO, E. L. M.; HIGUCHI, P.; CASTRO, G. C.; SILVA, A. C.; SANTOS, R. M.; BORGES, L. F. R.; CORRÊA, B. S.; ALVES, J. M. Dinâmica da comunidade e populações arbóreas da borda e interior de um remanescente florestal na serra da Mantiqueira, Minas Gerais, em um intervalo de cinco anos: 1999- 2004. **Revista Brasileira de Botânica**, São Paulo, v. 30, n. 1, p. 149-161, 2007.

QGIS DEVELOPMENT TEAM. QGIS Geographic Information System. **Open Source Geospatial Foundation Project**. Disponível em: <http://qgis.osgeo.org>.

RIBEIRO, M.C., METZGER, J.P., MARTENSEN, A.C., PONZONI, F.J., HIROTA, M.M. The Brazilian Atlantic Forest: how much is left, and how is the remaining forest distributed? Implications for conservation. **Biol. Conserv.** v. 142, p. 1141–1153, 2009.

RSTUDIO TEAM 2020. RStudio. Integrated Development for R. RStudio, PBC, Boston, MA. Disponível em: <http://www.rstudio.com/>.

SIEKLIICKI, J.; BIONE, N. C. P.; OLIVEIRA-FILHO, P. C.; SOUZA, V. F.; MARTINS, K. G. Relationships between land use and water quality obtained for the evaluation of genotoxic effects in plant bioindicators. **Ambiente & Água**, v. 14, n. 2, p. 2299, 2019.

SILVA, L. L. F.; MORAES, M. F; SILVA, R. B. Influência do uso e ocupação do solo na qualidade da água em bacias de captação para o abastecimento público. 59 p. **Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2016.**

SU, W.; AHERN, J. F.; CHANG, C. Why should we pay attention to “inconsistent” land uses? A viewpoint on water quality. **Landscape and Ecological Engineering**, v. 12, n. 2, p. 247-254, 2016.

TERRA, B. D. F.; HUGHES, R. M.; ARAUJO, F. G. Fish assemblages in Atlantic Forest streams: the relative influence of local and catchment environments on taxonomic and functional species. **Ecology Freshwater Fish**, v. 25, p. 527-544, 2015.

URIARTE, M.; YACKULIC, C.B.; LIM, Y.L.; ARCE-NAZARIO, A.J. Influence of land use on water quality in a tropical landscape: a multi-scale analysis. **Landscape Ecology**, v. 26, n. 8, p. 1151-1164, 2011.

VON SPERLING, M. **Noções de qualidade das águas. In: Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos.** 3 ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, 2005.

YIRIGUI, Y.; LEE, SW; NEJADASHEMI, AP; HERMAN, MR; LEE, JW. Relações entre fragmentação de mata ciliar e indicadores biológicos de riachos. **Sustentabilidade**, Suíça, v. 11, 2019.

ZAGATTO, P. A.; BERTOLETTI, E. **Ecotoxicologia aquática: princípios e aplicações**. São Paulo: Rima, 2006, 464 p.

CONSIDERAÇÕES FINAIS DA TESE

Devido a tamanha importância da água para permanência da existência humana e dos ecossistemas aquáticos e terrestres, assim como, da necessidade de assegurarmos este recurso de forma quali-quantitativa para as próximas gerações, o presente estudo demonstrou a grande relevância das áreas vegetadas nas APP na manutenção deste bem.

Com base nos resultados apresentados, observa-se de forma evidente a correlação direta entre as práticas de uso da terra nas proximidades de corpos hídricos e a fertilidade do solo nessas regiões, exercendo influência direta sobre a qualidade da água do respectivo corpo hídrico em função dos parâmetros de qualidade e também do IQA, destacando a influência positiva da vegetação. Vale ressaltar que a abordagem realizada, ao efetuar tais relações, representa uma contribuição inovadora e estabelece um fundamento essencial para a gestão de outras bacias hidrográficas que apresentem características urbanas e estejam em estágio de pleno desenvolvimento.

As áreas vegetadas atuaram de maneira significativa em relação a qualidade da água do corpo hídrico tanto na ausência quanto na presença de um evento pluviométrico, uma vez que esse tipo de ocupação da terra foi responsável por obter maiores índices de qualidade da água em ambas as condições avaliadas. Além de influenciar de maneira direta no IQA, as áreas vegetadas influenciaram também nos parâmetros de qualidade da água quando comparados as regiões com predominância urbana, servindo assim de filtro biológico na proteção do Rio das Antas.

Por meio dos fatos apresentados no primeiro e no segundo capítulo, conclui-se que a Floresta Nacional atua de maneira exponencial na recuperação da qualidade da água do Rio das Antas, favorecendo o processo de autodepuração do corpo hídrico. Essa porção de vegetação preservada é capaz de conter o avanço antrópico nas proximidades do rio devido a sua

obrigatoriedade de proteção, assim como, atua de maneira a filtrar os poluentes presentes na água e no solo.

Além disso, cabe considerar grande a eficiência da utilização dos neonatos do microcrustáceo *Daphnia magna* como indicadores ecotoxicológicos em águas de corpos hídricos. Este tipo de análise mostrou-se ter ótima aplicabilidade também em águas fluviais, não apenas em águas residuárias, uma vez que esta abordagem realizada neste estudo é pioneira. Diante dos dados de ecotoxicidade obtidos, pode-se verificar influência positiva neste parâmetro para as áreas urbanizadas e negativa com as regiões predominantemente vegetadas.

A continuidade deste estudo pode ser realizada de forma a avaliar de maneira temporal os pontos de amostragem adotados, verificando a influência do avanço antrópico na bacia hidrográfica em questão, uma vez que o município de Irati se encontra em pleno desenvolvimento, tal qual a atuação das águas dos demais afluentes do rio principal na qualidade do mesmo. Assim como, pode servir de estratégia na recuperação de áreas ripárias degradadas em ambientes urbanos do município e ainda aplicado em outras bacias hidrográficas as quais possuem características e problemas semelhantes a esta. Desta maneira, o estudo possui fundamento robusto para a formulação de estratégias e políticas públicas direcionadas à preservação e otimização dos recursos hídricos em contextos urbanos.