

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
CURSO DE AGRONOMIA**

NICOLAS MATHEUS RIBEIRO ORTIZ

Uso da Terra e Qualidade da Água na Sub-bacia Hidrográfica do Rio Marombas

Curitibanos

2022

Nicolas Matheus Ribeiro Ortiz

Uso da Terra e Qualidade da Água na Sub-bacia Hidrográfica do Rio Marombas

Trabalho Conclusão do Curso de Graduação do Centro de Ciências Rurais da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Agronomia.
Orientador: Prof. Dr. Joni Stolberg.

CURITIBANOS

2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Ortiz, Nicolas Matheus Ribeiro

Uso da Terra e Qualidade da Água na Sub-bacia Hidrográfica
do Rio Marombas / Nicolas Matheus Ribeiro Ortiz ; orientador,
Joni Stolberg, 2022.

64 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade
Federal de Santa Catarina, Campus Curitibanos, Graduação em
Agronomia, Curitibanos, 2022.

Inclui referências.

1. Agronomia. 2. Gestão de Recursos Naturais. 3.
Sensoriamento Remoto. I. Stolberg, Joni. II. Universidade
Federal de Santa Catarina. Graduação em Agronomia. III. Título.

Nicolas Matheus Ribeiro Ortiz

Uso da Terra e Qualidade da Água na Sub-bacia Hidrográfica do Rio Marombas

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Engenheiro Agrônomo e aprovado em sua forma final pelo Curso de Graduação em Agronomia.

Curitiba, 18 de novembro de 2022.



Documento assinado digitalmente
Douglas Adams Weiler
Data: 30/11/2022 20:51:15-0300
CPF: ***.111.820-**
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Dr. Douglas Adams Weiler
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:



Documento assinado digitalmente
Joni Stolberg
Data: 30/11/2022 17:51:07-0300
CPF: ***.796.929-**
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Dr. Joni Stolberg
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina



Documento assinado digitalmente
Alexandre Siminski
Data: 05/12/2022 14:54:26-0300
CPF: ***.101.149-**
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Dr. Alexandre Siminski.
Avaliador
Universidade Federal de Santa Catarina



Documento assinado digitalmente
Eduardo Marques Martins
Data: 30/11/2022 18:06:26-0300
CPF: ***.708.360-**
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Dr. Eduardo Martins
Avaliador
Universidade Federal de Santa Catarina

“De cada qual, segundo sua capacidade; a cada qual, segundo suas necessidades”

(Luis Blanc, 1839).

AGRADECIMENTOS

Aos meus professores e professoras, em especial ao Prof. Dr. Joni Stolberg pela mentoria e inspiração, à Profa. Dra. Sonia Purin por compartilhar as análises microbiológicas das águas, à Profa. Dra. Heloisa Maria de Oliveira pelas contribuições nas análises estatísticas e ao Prof. Dr. Eduardo Martins pela orientação nos procedimentos de sensoriamento remoto.

Às colegas estudantes Fernanda Pucci Rosá e Gabrielle França Ribeiro pelas contribuições nas campanhas de coleta.

À Michelle Karine Dondé, Farmacêutica egressa da UFSC, pelo material doado.

À Marina Rigon Sbravati, Eng.^a Florestal, por facilitar o acesso ao Rio das Pedras.

À minha família pelo carinho e suporte.

Muito obrigado!

RESUMO

A condução de atividades agrícolas de forma convencional, e a sua expansão no espaço e tempo podem ocasionar impactos ambientais, quer seja pela supressão de vegetação nativa e matas ciliares ou ainda pelo aumento do uso de agrotóxicos, fertilizantes e consequentes processos de lixiviação e percolação no solo que representam potenciais riscos de contaminação dos corpos d'água, de forma ainda mais expressiva quando as alterações mencionadas seguem desacompanhadas de programas de monitoramento da qualidade das águas. A Gestão Integrada de Recursos Hídricos promove a superação da abordagem setorial e fragmentada e está prevista como uma das diretrizes do Plano Nacional de Recursos Hídricos. Para que tenha êxito, um plano de gestão deve contemplar o monitoramento contínuo, possibilitando a avaliação dos RHs adjacentes às alterações de uso e de cobertura da terra das Bacias Hidrográficas. Na mesorregião Serrana do estado de Santa Catarina encontra-se a Sub-bacia hidrográfica do rio Marombas, componente da BH do Rio Canoas, fornecendo água para abastecimento industrial, irrigação para cultivos agrícolas, produção agropecuária e abastecimento público para dez municípios: Lebon Régis, São Cristóvão do Sul, Santa Cecília, Ponte Alta do Norte, Monte Carlo, Curitibanos, Frei Rogério, Brunópolis, Fraiburgo e Campos Novos. O objetivo principal deste trabalho consistiu em avaliar a influência da cobertura e uso da terra sobre a qualidade da água superficial na sub-bacia hidrográfica do Rio Marombas, utilizando a classificação da cobertura e uso da terra da área de estudo a partir de sensoriamento remoto, da determinação do Índice de Qualidade de Água para os cursos de água e da avaliação das relações entre o uso da terra e a qualidade da água por intermédio de técnicas estatísticas de Análise de Componentes Principais e Regressão Logística Multinomial. A classificação foi conduzida por intermédio de um algoritmo de Floresta Aleatória ou Random Forest, consistindo em um classificador composto por múltiplas árvores de decisão. O IQA consiste no produtório ponderado de nove parâmetros associados a qualidade da água: coliformes termotolerantes, pH, Oxigênio Dissolvido (OD), Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Nitratos, Fosfato Total, Temperatura, Turbidez e Resíduo Total após evaporação. Os resultados quanto a Classificação de Cobertura e Uso da Terra indicaram que a ocupação majoritária da sub-bacia hidrográfica do Rio Marombas é voltada às atividades produtivas ligadas à agricultura, pecuária e silvicultura, alcançando mais de 60% da cobertura total da terra. Os Índices de Qualidade de Água determinados variaram entre “Bom” e “Ruim”, valor máximo de 78,86 e valor mínimo de 45,49, demonstrando expressiva sensibilidade dos corpos d'água aos potenciais poluidores presentes na sub-bacia, apresentando valores alterados de coliformes termotolerantes, turbidez e fósforo total, reduzindo os valores dos IQAs em todas as áreas estudadas ao longo das campanhas de coleta realizadas no Rio Pessegueirinho, no Rio Marombas, Rio das Pedras e Rio Correntes. Durante o período de realização das análises, foram detectadas relações significativas entre áreas com maior ocupação das classes de cobertura/uso da terra “Agricultura”, “Pastagem”, “Mosaico de Agricultura e Pastagem” e “Silvicultura” para com os parâmetros de qualidade da água pH e turbidez.

Palavras-chave: IQA. Random Forest. Cobertura e Uso da Terra. Recursos Hídricos.

ABSTRACT

Conducting agricultural activities in a conventional way, and its expansion in space and time (change in land use and in the type of soil cover) can cause environmental impacts, either through the suppression of native vegetation and riparian forests or even through the increase in the use of pesticides, fertilizers and consequent processes of leaching and percolation in the soil that represent potential risks of contamination of water bodies, even more expressively when the aforementioned changes are not accompanied by water quality monitoring programs. The Integrated Management of Water Resources promotes the overcoming of the sectorial and fragmented approach and is foreseen as one of the guidelines of the National Water Resources Plan. In order to be successful, a management plan must include continuous monitoring, enabling the assessment of WRs adjacent to changes in the use and cover of the watershed's land. In the Serrana mesoregion of the state of Santa Catarina, is located the Marombas river hydrographic sub-basin, component of the Canoas River BH, supplying water for industrial supply, irrigation for agricultural crops, agricultural production in addition to public supply for ten municipalities: Lebon Régis, São Cristóvão do Sul, Santa Cecília, Ponte Alta do Norte, Monte Carlo, Curitibanos, Frei Rogério, Brunópolis, Fraiburgo and Campos Novos. The main objective of this work was to evaluate the influence of land cover and land use on surface water quality in the Marombas River sub-basin, using the land cover and land use classification of the study area based on remote sensing, the determination of the Water Quality Index for watercourses and the evaluation of the relationships between land use and water quality through statistical techniques of Principal Component Analysis and Multinomial Logistic Regression. The classification was conducted through a Random Forest algorithm, consisting of a classifier composed of multiple decision trees. The WQI consists of a weighted product of nine parameters associated with water quality: thermotolerant coliforms, pH, Dissolved Oxygen (DO), Biochemical Oxygen Demand (BOD), Nitrates, Total Phosphate, Temperature, Turbidity and Total Residue after evaporation. The results regarding the Land Cover and Use Classification indicated that the majority occupation of the Marombas River sub-basin is focused on productive activities linked to agriculture, livestock and forestry, reaching more than 60% of the total land cover. The determined Water Quality Indexes varied between "Good" and "Bad", maximum value of 78.86 and minimum value of 45.49, demonstrating expressive sensitivity of water bodies to potential pollutants present in the sub-basin, presenting values altered thermotolerant coliforms, turbidity and total phosphorus, reducing IQA values in all areas studied throughout the collection campaigns carried out on the Pessegueirinho River, Marombas River, Pedras River and Correntes River. During the analysis period, significant relationships were detected between areas with greater occupation of the land cover/use classes "Agriculture", "Pasture", "Mosaic of Agriculture and Pasture" and "Forestry" with the quality parameters of water pH and turbidity.

Keywords: WQI. Random Forest. Land Use/Land Cover. Water Resources.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Porcentagem de captação de água do Brasil para atividades agrícolas, industriais e abastecimento municipal.....	12
Figura 2 - Diagrama do Algoritmo de Floresta Aleatória.....	18
Figura 3 - Mapa Temático e de Localização da Sub-bacia Hidrográfica do Rio Marombas.	24
Figura 4 - Vetor categorizado a partir das classes MapBiomas.....	25
Figura 5 - Visualização dos perfis espectrais das classes amostradas.....	26
Figura 6 - Pontos de Coleta de Água.....	27
Figura 7 - pHmetro utilizado nas análises.....	28
Figura 8 - Turbidímetro utilizado nas análises.....	28
Figura 9 - Cápsulas de porcelana utilizadas nas análises.....	29
Figura 10 - Balões volumétricos, cubetas de vidro e espectrofotômetro utilizados nas análises.....	30
Figura 11 - Gráfico com exemplo de uma curva de calibração para $P-PO_4^{3-}$	30
Figura 12 - Frascos de incubação utilizados na determinação de DBO.....	32
Figura 13 - Sonda amperométrica utilizada na determinação de OD.....	32
Figura 14 - Distribuição do erro das classes ao longo do número de árvores de decisão.....	34
Figura 15 - P5 antes do alagamento consequente da barragem São Roque (07/02/2021).....	37
Figura 16 - P5 após alagamento consequente da barragem São Roque (13/08/2022).....	37
Figura 17 - Distribuição dos pontos de coleta sobre os eixos dos componentes principais....	42
Figura 18 - Distribuição de P1 e P4 destacada sobre os eixos dos componentes principais...	43
Figura 19 - Distribuição de P1 e P3 destacada sobre os eixos dos componentes principais...	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Pesos ponderados atribuídos aos parâmetros para o IQA.....	19
Tabela 2 - Valores, classes e interpretação do Índice de Qualidade de Água.....	20
Tabela 3 - Resolução Espectral do OLI Landsat.....	25
Tabela 4 - Coeficientes de correlação, determinação, angular e linear da regressão para a curva de calibração exibida na Figura 11.....	31
Tabela 5 - Matriz de confusão gerada a partir do número de pixels no modelo de classificação RF, para a sub-bacia do Marombas.....	35
Tabela 6 - Pontos de coleta de água, áreas e proporções ocupadas com as classes de cobertura e uso para as áreas de drenagem estudadas.....	36
Tabela 7 - Resultados, desvios, médias dos parâmetros analisados e valores de referência para águas de Classe 2 (CONAMA, 2005).....	38
Tabela 8 - IQAs para campanhas, locais de coleta e valores médios.....	41
Tabela 9 - Porcentagem da variância intrínseca em cada dimensão.....	42
Tabela 10 - Cargas de contribuição de cada parâmetro sobre os componentes principais.....	43
Tabela 11 - Resultados do modelo RLM e Teste de Wald.....	46

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ALOS - *Advanced Land Observing Satellite*
ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
APHA - *American Public Health Association*
BH - Bacia Hidrográfica
CETESB - Centro Tecnológico de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente
CTT - Coliformes Termotolerantes
DBO - Demanda Bioquímica de Oxigênio
E.C. - *Escherichia coli*, referente ao meio de cultura
EROS - *Earth Resources Observation and Science Center*
FUNASA - Fundação Nacional de Saúde
GRASS - *Geographic Resources Analysis Support System*
IGAM - Instituto Mineiro de Gestão das Águas
IQA - Índice de Qualidade de Água
LecoS - *Landscape Ecology Statistics*
MDE - Modelo Digital de Elevação
NMP - Número Mais Provável
NSF - *National Sanitation Foundation*
O.R. - *Odds Ratio*
OD - Oxigênio Dissolvido
OLI - *Operational Land Imager*
OOB - *Out of Bag*
PALSAR - *Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar*
PCA - *Principal Components Analysis*
pH - Potencial Hidrogeniônico
PNRH - Plano Nacional de Recursos Hídricos
PT - Fosfato Total
QGIS - *Quantum Geographic Information System*
RF - *Random Forest*
RHs - Recursos Hídricos
RLM - Regressão Logística Multinomial
SRTM - *Shuttle Radar Topography Mission*
ST - Sólidos Totais
TB - Turbidez
UNESCO - *United Nations' Educational, Scientific and Cultural Organization*
UNT - Unidade Nefelométrica de Turbidez

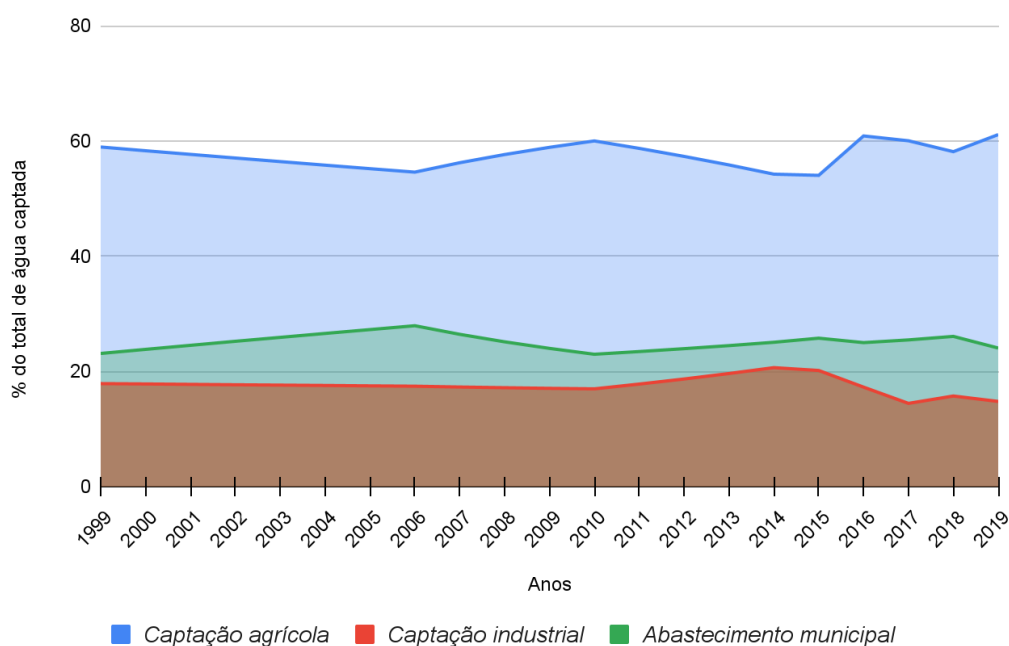
SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	OBJETIVOS.....	13
1.1.1	Objetivo Geral.....	13
1.1.2	Objetivos Específicos.....	14
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	15
2.1	GESTÃO E MONITORAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS.....	15
2.2	CLASSIFICAÇÃO DE COBERTURA E USO DA TERRA.....	16
2.3	ÍNDICE DE QUALIDADE DA ÁGUA.....	19
2.4	IMPACTOS AMBIENTAIS DA AGRICULTURA EM ÁGUAS SUPERFICIAIS ...	20
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	23
3.1	ÁREA DE ESTUDO.....	23
3.2	CLASSIFICAÇÃO VIA ALGORITMO “FLORESTA ALEATÓRIA”	24
3.3	AMOSTRAGEM DE ÁGUA E PROCEDIMENTO DE LABORATÓRIO.....	26
3.4	RELAÇÃO ENTRE COBERTURA/USO DA TERRA E QUALIDADE DE ÁGUA.....	33
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	34
4.1	COBERTURA E USO DA TERRA.....	34
4.2	QUALIDADE DA ÁGUA.....	38
4.3	COBERTURA/USO DA TERRA <i>versus</i> QUALIDADE DA ÁGUA.....	41
5	CONCLUSÃO.....	48
	REFERÊNCIAS.....	49
	APÊNDICE A – Bloco de código em R com o programa para classificação via Random Forest.....	54
	APÊNDICE B – Mapa Temático de cobertura e uso da terra produzido a partir da classificação RF (1:400.000).....	57
	APÊNDICE C – Detalhamento dos valores de qualidade (qi) de cada parâmetro avaliado.....	58
	ANEXO A – Curvas médias da variação da qualidade (qi) de cada parâmetro.....	63

1 INTRODUÇÃO

A água é indispensável nas mais diversas atividades produtivas e também essencial para a manutenção da vida no planeta Terra. A desigualdade socioeconômica torna desafiador o acesso aos recursos hídricos e estima-se que a demanda de água até o ano de 2050 seja elevada entre 20% e 30% em relação a quantidade atual de uso (UNESCO, 2019). Enquanto um recurso finito, os parâmetros quantitativos, sua disponibilidade, não devem ser tomados em detrimento dos fatores qualitativos, suas condições de salubridade e de conservação, uma vez que estes estão intimamente relacionados com alterações por influência de processos naturais (intemperismos do solo e precipitação) e atividades antropogênicas (agricultura, produção industrial, esgotos não tratados). Atividades agrícolas, incluindo a pecuária e aquicultura, consomem aproximadamente 70% do total da água captada no mundo todo (UNESCO, 2021) sendo que no Brasil, em 2019, essa fração contabilizou mais de 60% do total, representando a atividade com maior consumo de água do país nos últimos 20 anos (AQUASTAT, 2022) como demonstrado no gráfico abaixo em comparação com abastecimentos municipais e atividades industriais:

Figura 1 - Porcentagem de captação de água do Brasil para atividades agrícolas, industriais e abastecimento municipal.



Fonte: AQUASTAT, processado pelo autor (2022)

No mais recente Relatório das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento Mundial da Água foi apontada a estimativa de que a poluição agrícola superou as contaminações oriundas da urbanização e indústrias, revelando um cenário preocupante, considerando o iminente aumento de 50% na demanda de alimentos, rações e biocombustíveis nos próximos 30 anos, sendo fundamental aumentar a produtividade agrícola por meio da intensificação sustentável da captação de águas e ao mesmo tempo reduzir passivos ambientais relacionados (UNESCO, 2022).

Não obstante, ao longo dos anos é observada uma lógica expansionista de “superção das barreiras agrícolas”. Desde a década de 1980 o Brasil perdeu 71.000.000 de hectares de vegetação natural, principalmente para a pecuária e agricultura. Áreas dedicadas à pastagem aumentaram em 46% e à agricultura em 172% (SOUZA JR. *et al.*, 2020). Na sub-bacia hidrográfica do Rio Marombas, entre 1989 e 2011, foi registrado um aumento de 100% da área dedicada à agricultura e a duplicação da área destinada às práticas silvícolas (TEN CATEN; SAFANELLI; RUIZ, 2015). A condução de atividades agrícolas de forma convencional, e a sua expansão no espaço e tempo (a alteração do uso da terra e do tipo de cobertura do solo) podem ocasionar impactos ambientais, quer seja pela supressão de vegetação nativa e matas ciliares ou ainda pelo aumento do uso de agrotóxicos, fertilizantes e consequentes processos de lixiviação e percolação no solo que representam potenciais riscos de contaminação dos corpos d’água, de forma ainda mais expressiva quando as alterações mencionadas seguem desacompanhadas de programas de monitoramento da qualidade das águas. Nesse sentido formula-se o questionamento central do presente trabalho: qual a influência das classes de cobertura e uso da terra, relacionadas a cultivos agrossilvipastoris, sobre a qualidade da água superficial na sub-bacia hidrográfica do Rio Marombas?

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar a influência da cobertura e uso da terra sobre a qualidade da água superficial na sub-bacia hidrográfica do Rio Marombas.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Classificar a cobertura e uso da terra das sub e microbacias da área de estudo a partir de sensoriamento remoto;
- Determinar o Índice de Qualidade de Água para os cursos de água;
- Avaliar relações entre o uso da terra e a qualidade da água.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A revisão de bibliografia apresentada busca referenciar conceitos da classificação de cobertura e uso da terra, da avaliação da qualidade de águas superficiais bem como a importância de verificar as possíveis alterações na qualidade dos recursos hídricos de acordo com as atividades desenvolvidas sobre as terras das bacias hidrográficas.

2.1 GESTÃO E MONITORAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS

O Brasil é um dos países mais ricos em biodiversidade no mundo. A Amazônia, a Mata Atlântica, a Caatinga, o Cerrado, o Pampa e o Pantanal são biomas únicos com grandes estoques de carbono em sua vegetação e solos além de abrigar a maior reserva de água doce do planeta (SOUZA JR, *et al.*, 2020). No que diz respeito à gestão de recursos naturais, especialmente dos recursos hídricos (RHs), a ilusão de farta disponibilidade dá margem ao emprego de técnicas inadequadas, ocasionando ciclos de consequências negativas no âmbito econômico, social e ambiental, comprometendo o desenvolvimento e o bem-estar da população (PEREIRA; BARBIEIRO; QUEVEDO, 2020). A Gestão Integrada de Recursos Hídricos promove a superação da abordagem setorial e fragmentada e está prevista como uma das diretrizes do Plano Nacional de Recursos Hídricos - PNHR (SENRA; NASCIMENTO, 2017). Instituído pela Lei Nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, o PNRH fundamenta a bacia hidrográfica como uma unidade territorial para gerenciamento de recursos, assegurando à atual e às futuras gerações a necessária disponibilidade de água, em padrões de qualidade adequados aos usos múltiplos, a partir da articulação da gestão de recursos hídricos com a do uso da terra (BRASIL, 1997). Para que tenha êxito, um plano de gestão deve contemplar o monitoramento contínuo, possibilitando a avaliação dos RHs adjacentes às alterações de uso e de cobertura da terra das Bacias Hidrográficas.

“Sem o monitoramento sistemático, seguido pela avaliação, a oportunidade de aprender com a experiência é reduzida assim como a oportunidade de fazer ajustes à luz de novas informações, de conhecimentos e da experiência”. (World Meteorological Organization, 2009 *apud* PEREIRA; BARBIEIRO; QUEVEDO, 2020).

A definição de uma área em que se empregam análises socioambientais e planos de gestão é discutida por Gomes, Bianchi e Oliveira (2019). Reconhecendo a multidimensionalidade dos conceitos, as propostas de aprimoramentos dos autores nas definições de Bacia Hidrográfica, Sub-bacia Hidrográfica e Microbacia Hidrográfica são utilizadas neste trabalho, conforme o quadro a seguir:

Quadro 1 - Definições de Bacias Hidrográficas e subdivisões.

Conceito	Definição
Bacia hidrográfica (BH)	“Um sistema aberto e dinâmico, passível de delimitação espacial a partir de critérios sociais, geológicos e geomorfológicos integradamente [...] Concebida também como um hidroterritório ou território, uma paisagem, um sistema ambiental, um geossistema ou como uma bacia de drenagem conforme a natureza do estudo”.
Sub-bacia hidrográfica	“Um fragmento do sistema fluvial composto essencialmente por outras sub-bacias e/ou microbacias hidrográficas, que apresentam padrões de drenagem endorreica e são tributárias de uma BH mais complexa”.
Microbacia hidrográfica	"A menor categoria hierárquica de uma BH, que habitualmente é representada por drenagens de primeira e segunda ordens (podendo abranger um rio de terceira ordem, caso um ou mais de seus antecedentes sejam canais efêmeros) que confluem para uma sub-bacia ou para a BH mais complexa do sistema fluvial”.

Fonte: Gomes, Bianchi e Oliveira (2019)

A área de estudo deste trabalho é referida como “sub-bacia” uma vez que esta é parte integrante da BH do Rio Canoas, submetida às atribuições normativas, deliberativas e consultivas exercidas pelo Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Canoas, órgão colegiado gestor dos recursos hídricos desta região.

2.2 CLASSIFICAÇÃO DE COBERTURA E USO DA TERRA

O termo Cobertura do Solo refere-se à camada física e biológica sobre a superfície da terra, incluindo água, vegetação, solo nu e estruturas artificiais. O Uso da Terra pode ser definido em termos de “síndromes de atividades humanas, como agricultura, silvicultura e construção civil, que alteram os processos da superfície da terra, incluindo biogeoquímica, hidrologia e biodiversidade” (ELLIS; PONTIUS, 2007 *apud* NEDD *et al.*, 2021).

Atualmente há demandas crescentes para mapeamento de cobertura e uso, visando contribuir no gerenciamento de terras e monitoramento de recursos naturais (CENGIZ *et al.*, 2022). Com o advento cada vez mais expressivo de algoritmos de Aprendizado de Máquina, diferentes métodos são desenvolvidos e conduzidos através de sensoriamento remoto para classificação supervisionada e não-supervisionada, elevando a acurácia e popularizando a aplicação destas técnicas (SHETTY, 2019).

Acerca do estado da arte, destacam-se algoritmos como Redes Neurais Artificiais, Máquinas de Vetores de Suporte, Floresta Aleatória entre outros (TALUKDAR *et al.*, 2020). Neste trabalho, foi aplicado o algoritmo de Floresta Aleatória, em concordância com os estudos em território brasileiro desenvolvidos pelo MapBiomas (SOUZA JR, *et al.*, 2020) e ainda com a pretensão de verificar a qualidade da classificação por meio de validação cruzada, quando for disponibilizado o produto mais recente desta iniciativa, previsto para agosto de 2023.

Em um estudo de revisão bibliográfica sobre definições, sistemas de classificação e lacunas no conhecimento sobre Cobertura/Usos da Terra, Nedd *et al.* (2021) elucidam sobre a importância dos sistemas de classificação para a qualificação de estudos sobre alterações de paisagens, com base em atualizações constantes, precisão, validação e adequação de uso para escalas nacionais, continentais ou globais. As classes referenciadas foram reconhecidas no processo de amostragem até o Nível 2 do Esquema de Classificação do MapBiomas e constam no Quadro 2, juntamente com a definição estabelecida pelos autores.

Quadro 2 - Sistema de classificação de cobertura e uso da terra para o Brasil.

Nível 1	Nível 2	Descrição
Floresta	<i>Formação Florestal Natural</i>	Tipo de vegetação com predominância de espécies arbóreas com dossel contínuo e denso, incluindo áreas impactadas por queimadas e/ou desmatamento, e vegetação resultante de regeneração natural.
	<i>Silvicultura</i>	Árvores cultivadas com finalidade comercial.
Lavoura	<i>Pastagem</i>	Áreas de pastagem natural ou plantada, relacionadas à agropecuária.
	<i>Agricultura</i>	Áreas predominantemente ocupadas com cultivos anuais e perenes.
	<i>Mosaico de Agricultura e Pastagem</i>	Áreas cultivadas, indistinguíveis entre pastagem e agricultura.
Área não Vegetada	<i>Infraestrutura Urbana</i>	Áreas Urbanas com superfície predominantemente não vegetada, incluindo estradas, rodovias e construções.
	<i>Outras Áreas não Vegetadas</i>	Áreas superficiais não vegetadas. Infraestrutura, área urbana, minas e solo exposto.
Água	<i>Corpos d'água</i>	Rios, lagos, reservatórios de barragens e outros corpos d'água.

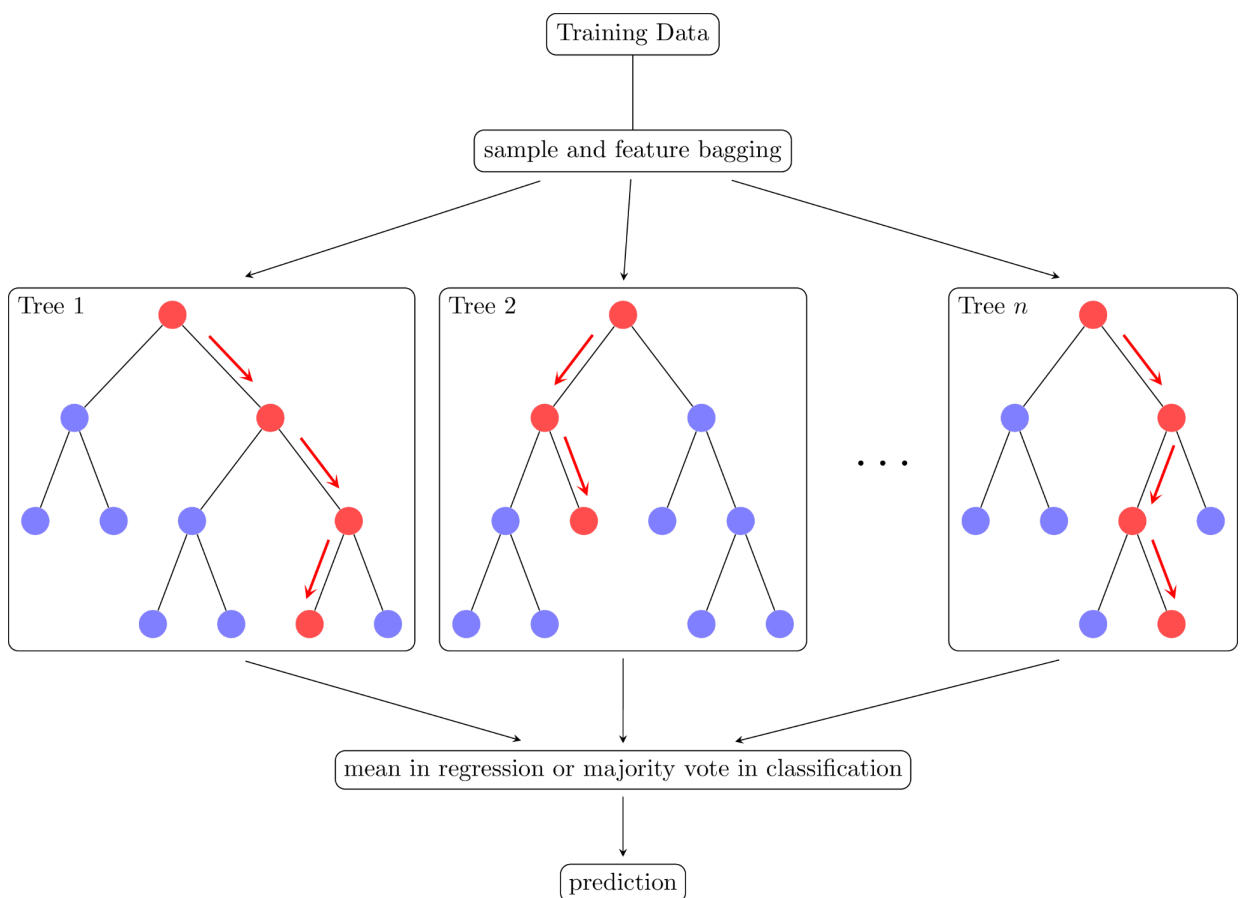
Fonte: adaptado de Souza Jr., *et al.* (2020)

A classificação foi conduzida por intermédio de um algoritmo de Aprendizado de Máquina (SAMUEL, 2000), um dos motores da Inteligência Artificial que utiliza de técnicas estatísticas para prover aos sistemas de computadores a habilidade de "aprender", isto é, melhorar progressivamente sua performance na realização de uma tarefa específica. São programas de computador que escrevem programas de computador. O método utilizado nesse estudo, Floresta Aleatória ou *Random Forest* (RF), consiste em um classificador composto por múltiplas árvores de decisão:

$$\{h(x, \Theta_k), k = 1, \dots\} \quad (1)$$

Em que $\{\Theta_k\}$ são vetores aleatórios independentes, identicamente distribuídos, e cada árvore de decisão lança um voto unitário para a classe mais popular na entrada x (BREIMAN, 2001), conforme ilustrado pela Figura 2. O código em R, com a programação aplicada é apresentado no APÊNDICE A.

Figura 2 - Diagrama do Algoritmo de Floresta Aleatória.



Fonte: Riebesell (2021).

2.3 ÍNDICE DE QUALIDADE DA ÁGUA

O monitoramento e avaliação da qualidade da água são comumente determinados pelo cálculo de índices. Um dos índices mais utilizados no mundo todo é o Índice de Qualidade da Água desenvolvido pela *National Sanitation Foundation* (IQA-NSF) a partir do trabalho de Brown *et al.* (1972). Para ser utilizado no Brasil o IQA-NSF foi adaptado pelo Centro Tecnológico de Saneamento Básico do Estado de São Paulo, denominado IQA-CETESB, e também pelo Instituto Mineiro de Gestão das Águas, chamado de IQA-IGAM, consistindo no produtório ponderado de parâmetros associados a qualidade da água.

$$IQA = \prod_{i=1}^9 q_i^{w_i} \quad (2)$$

Sendo:

IQA: valor adimensional entre 0 e 100, resultante do produto das qualidades dos parâmetros;

q_i : qualidade do *i*-ésimo parâmetro (entre 0 e 100), obtido da respectiva curva de variação (ANEXO A);

w_i : peso correspondente ao *i*-ésimo parâmetro.

Os parâmetros associados a qualidade da água utilizados para o cálculo do IQA são: coliformes termotolerantes, pH, Oxigênio Dissolvido (OD), Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Nitrogênio Total (ou Nitratos), Fósforo Total (ou Fosfatos), Temperatura, Turbidez e Resíduo Total após evaporação (ANA, 2009). Estas nove variáveis são sistematizadas em curvas médias de variação com distintos pesos relativos (Tabela 1).

Tabela 1 - Pesos ponderados atribuídos aos parâmetros para o IQA.

Parâmetro	Peso (w_i)
Oxigênio dissolvido - OD (%OD _{sat})	0,17
Coliformes termotolerantes (NMP/100mL)	0,15
pH	0,12
Demanda bioquímica de oxigênio - DBO _{5,20} (mg/L)	0,10
Nitratos - (mg/L NO ₃ ⁻)	0,10
Fosfato Total - (mg/L P)	0,10
Temperatura - (°C)	0,10
Turbidez - (NTU)	0,08
Sólidos Totais - (mg/L)	0,08

Fonte: Instituto Mineiro de Gestão das Águas - IGAM (2019).

Neste trabalho foi determinado o IQA-IGAM, em função das espécies de nitrogênio e fósforo empregadas neste índice em particular estarem mais relacionadas a potenciais contaminantes agrícolas (nitratos e fosfato total), bem como por adequar-se melhor às possibilidades de avaliação a partir das técnicas, materiais e equipamentos disponíveis.

O valores de IQA, além de resumir nove variáveis indicativas da qualidade de água, apresentam como vantagem a facilidade de divulgação de resultados para o público em geral, contemplando intervalos de notas, classes para cada intervalo e ainda um código de cores que facilita interpretações, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Valores, classes e interpretação do Índice de Qualidade de Água.

Valor do IQA	Classes	Significado
$90 < \text{IQA} \leq 100$	Excelente	Águas próprias para tratamento convencional visando abastecimento público.
$70 < \text{IQA} \leq 90$	Bom	
$50 < \text{IQA} \leq 70$	Médio	
$25 < \text{IQA} \leq 50$	Ruim	Águas impróprias para tratamento convencional.
$\text{IQA} \leq 25$	Muito ruim	

Fonte: IGAM (2019).

2.4 IMPACTOS AMBIENTAIS DO USO DA TERRA EM ÁGUAS SUPERFICIAIS

Diferentes usos da terra expressam diferentes graus de risco aos recursos hídricos, dentre estes destacam-se áreas urbanas e agrícolas como principais responsáveis pela degradação da qualidade da água (DE MELLO *et al.*, 2020). O desconhecimento da gestão integrada de solo, a falta de capacidade gerencial dos municípios, a visão setorializada do planejamento, a desinformação da população e a concepção inadequada de profissionais da engenharia estão diretamente relacionados com a deterioração da qualidade da água.

Taniwaki *et al.* (2017) investigaram os impactos sobre mananciais hídricos em paisagens convertidas de pastagens para lavouras de cana-de-açúcar destinadas à produção de bioenergia, no sudoeste do país, e relataram sensíveis alterações na qualidade da água, principalmente em função de efluentes de drenagem dos cultivos. Os valores médios para concentração de nitratos aferidos foram quatro vezes superiores em comparação com a área de estudo antes da modificação do uso da terra. Os autores associaram o aumento nas concentrações principalmente às práticas de manejo intensivas como adubações e mobilização do solo, reconhecidamente causadoras de processos erosivos e de lixiviação de sedimento e nutrientes para os mananciais próximos. Também foram relatados impactos mais intensos

quando a vegetação nas áreas de cabeceira da bacia encontrava-se em processo de degradação, reforçando a importância de melhores práticas agrícolas concomitantes à preservação de áreas previstas em legislação.

Simedo *et al.* (2018) analisaram amostras de água em áreas de nascentes de microbacias ocupadas primordialmente com cultivos agrícolas, localizadas na bacia do Córrego da Olaria, no município de Pindorama - São Paulo. Em épocas de chuva foram encontrados os valores máximos de nitrato (11,26 mg/L) e fósforo total (0,11 mg/L), os quais são superiores aos valores permitidos pela resolução nº 357/2005 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2005).

Na bacia do rio Desquite, componente da BH do Rio Canoas, no município de Otacílio Costa - SC, também fortemente ocupada por atividades agrícolas e silvícolas (>70% de sua área), Berlanda *et al.* (2021) avaliaram a qualidade da água, encontrando valores elevados para concentração de fósforo total (0,40 mg/L em média para áreas rurais). Os resultados indicam restrições ao uso da água, conforme diretrizes de classificação de corpos d'água do CONAMA, e ilustram como a escala das atividades agroflorestais desenvolvidas na mesorregião Serrana de Santa Catarina representam potencial poluidor.

Em estudos recentes, que relacionam índices de qualidade de água juntamente com avaliações de cobertura e uso da terra, são demonstrados sensíveis declínios da qualidade das águas devido à intensificação e expansão geográfica das atividades relacionadas principalmente à agricultura e pastagem, apontando a complexidade de conciliar a gestão do uso da terra com a gestão das águas, devido ao gerenciamento do uso da terra em nível municipal descolado da gestão das águas por bacia hidrográfica (MAGALHÃES JR; LOPES; MACEDO, 2019). Santos, Cordeiro e Vieira (2021) também exaltam a importância de planejamento estratégico com medidas adequadas para minimizar situações de conflito e otimizar as situações envolvendo classes de uso agropecuário, bem como a manutenção das áreas de remanescentes florestais e a restauração das áreas de preservação permanente ao longo dos rios, para a gestão eficaz e uso sustentável das bacias hidrográficas.

O panorama dos impactos da antropização em recursos hídricos também é evidenciado internacionalmente, sendo relatadas correlações significativas entre as áreas urbanizadas, ocupadas com cultivos agrícolas e concentrações de fósforo total (0,096 mg/L) e nitrogênio total (2,385 mg/L) em águas superficiais (WAN *et al.*, 2014), impactos negativos na qualidade da água associados à aplicação intensiva de fertilizantes químicos e alterações da cobertura do solo (WANG; ZHANG, 2018), principalmente no que diz respeito ao incremento

de áreas ocupadas com agricultura e a redução de formações florestais naturais e campos nativos (UMWALI *et al.*, 2021).

A falta de atenção ao controle do uso da terra, no que tange o uso abusivo de fertilizantes na agricultura e a conseqüente deposição de efluentes nos mananciais (principalmente Nitrogênio e Fósforo), são fatores determinantes para processos de eutrofização de águas superficiais. A eutrofização é o enriquecimento no meio aquático com nutrientes que ocasionam o crescimento insustentável de organismos aquáticos, podendo atingir níveis que sejam causadores de interferências aos usos desejáveis do corpo d'água (THOMANN; MUELLER, 1987 *apud* VON SPERLING, 1996). Processos de eutrofização também podem estimular o desenvolvimento de cianotoxinas (microcistinas), produzidos por diversas espécies de cianobactérias, tais como os gêneros *Microcystis*, *Planktothrix* (*Oscillatoria*), *Anabaena*, *Nostoc*, *Hapalosiphon* e *Anabaenopsis*. Águas eutrofizadas, contaminadas por microcistinas, podem oferecer riscos às populações abastecidas por esses recursos hídricos, como casos de hepatotoxicidade e até mesmo processos carcinogênicos (EMÍDIO, 2012).

3 MATERIAL E MÉTODOS

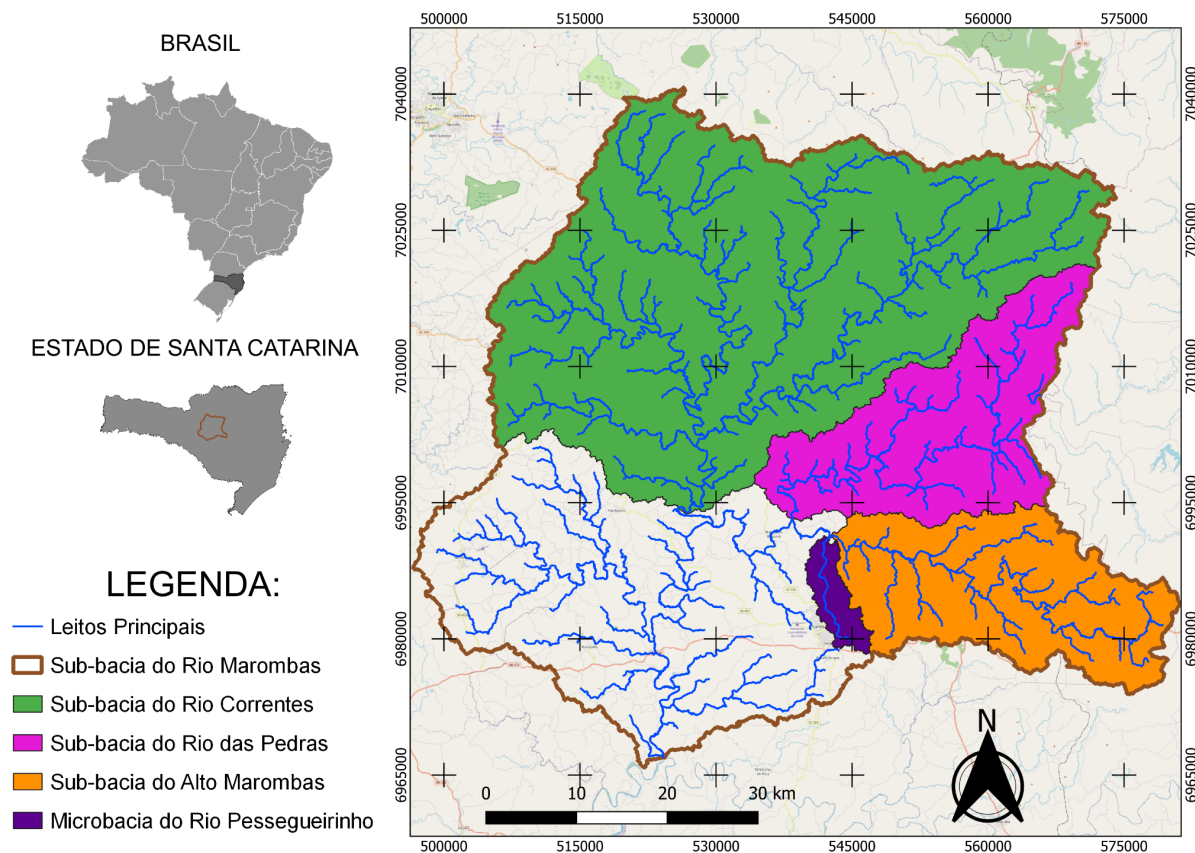
3.1 ÁREA DE ESTUDO

Na mesorregião Serrana do estado de Santa Catarina encontra-se a Sub-bacia hidrográfica do rio Marombas, componente da BH do Rio Canoas, fornecendo água para abastecimento industrial, irrigação para cultivos agrícolas, produção agropecuária além do abastecimento público para dez municípios: Lebon Régis, São Cristóvão do Sul, Santa Cecília, Ponte Alta do Norte, Monte Carlo, Curitibanos, Frei Rogério, Brunópolis, Fraiburgo e Campos Novos. O rio principal que dá nome à sub-bacia, é responsável pela drenagem de uma área de 3.938 km² ao longo de um percurso de 145 km até o seu deságue no rio Canoas (LUNARDI NETO *et al.*, 2020). Ao longo do trajeto, o Rio Marombas recebe contribuição de diversos mananciais, dentre eles o Rio Pessegueirinho, o Rio das Pedras e o Rio Correntes.

Buscando informações mais concretas sobre as áreas de drenagem, decidiu-se realizar a delimitação da Sub-bacia e suas componentes a partir do Modelo Digital de Elevação (MDE) ALOS-PALSAR (*Advanced Land Observing Satellite - Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar*), produto com correção radiométrica de terreno processados pela *Alaska Satellite Facility*, dotado de resolução espacial de 12,5 m (ASF DAAC, 2015) possibilitando produção cartográfica Classe A com escala de trabalho de 1:25.000 (PARANHOS FILHO *et al.*, 2021). Utilizando as ferramentas *r.watershed* para o cálculo de parâmetros hidrológicos como a direção de drenagem e acúmulo de fluxo, *r.water.outlet* para determinar a área das bacias em questão a partir da direção de drenagem e *r.stream.extract* para a extração dos vetores dos mananciais que conformam as bacias e suas divisões. Estas ferramentas são componentes do pacote GRASS (*Geographic Resources Analysis Support System*) no *software* de Sistema de Informações Geográficas QGIS (GRASS Development Team, 2017).

Após o processamento do material foi gerado um mapa temático e de localização para as divisões das áreas de interesse, denominadas hierarquicamente como Sub-bacia Hidrográfica do Rio Marombas, Sub-bacia do Alto-Marombas, Sub-bacia do Rio das Pedras, Sub-bacia do Rio Correntes e Microbacia do Rio Pessegueirinho, representadas na Figura 3.

Figura 3 - Mapa Temático e de Localização da Sub-bacia Hidrográfica do Rio Marombas.



Fonte: processado pelo autor (2022)

3.2 CLASSIFICAÇÃO VIA ALGORITMO “FLORESTA ALEATÓRIA”

Para a classificação de cobertura e uso da terra, inicialmente foi selecionada uma cena gerada pelo sensor *Operational Land Imager* (Landsat-9, 2022). Os esforços nessa etapa concentram-se em localizar um produto sem cobertura de nuvens significativa sobre o espaço das áreas de interesse, gerado num período coerente com as coletas de água, a partir do Nível 2 da coleção Landsat, visto que esses produtos incluem entradas de dados auxiliares necessárias para gerar um produto cientificamente viável (EROS, 2022).

A composição da imagem contou com sete bandas espectrais de comprimentos de onda entre 0,43 e 2,29 μm , cobrindo da região visível até o infravermelho de ondas curtas, com resolução espacial de 30 m (EROS, 2022). Yu *et al.* (2019) avaliaram correlações e multicolinearidade entre bandas multiespectrais do satélite *Landsat 8* e seus resultados mostraram que as combinações das bandas 4, 5, 6, das bandas 1, 2, 5, 7 e das bandas 2, 5, 6, 7 são as melhores combinações de banda para classificações de cobertura e uso da terra, demonstrando possibilidades de melhorias futuras na etapa de pré-processamento de imagens.

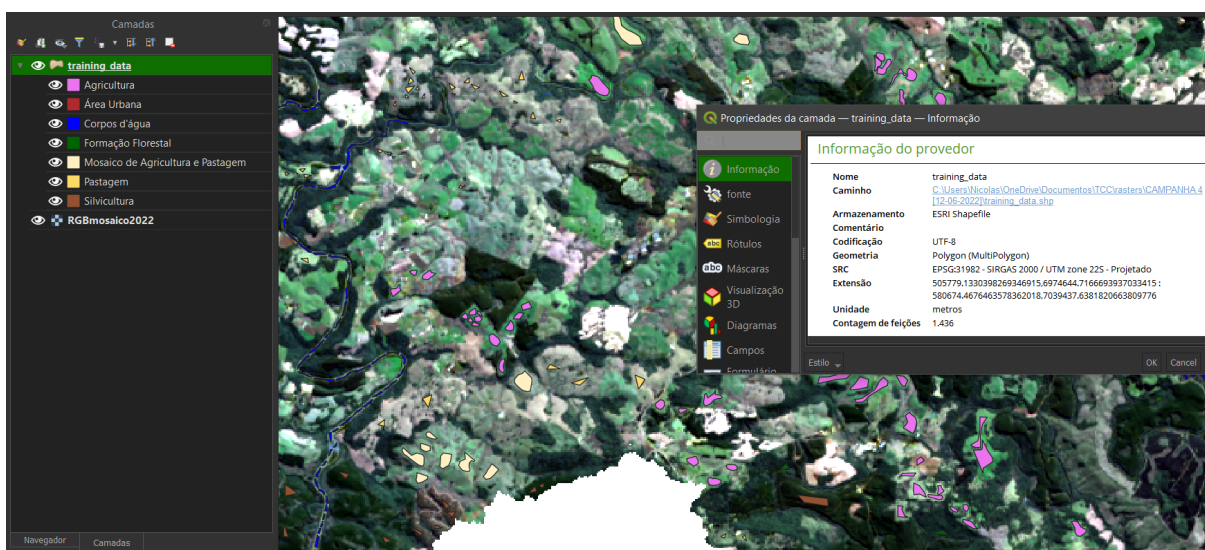
Tabela 3 - Resolução Espectral do OLI Landsat.

Bandas	Comprimento de Onda (μm)
1 - Ultravioleta	0,435 – 0,451
2 - Azul	0,452 – 0,512
3 - Verde	0,533 – 0,590
4 – Vermelho	0,636 – 0,673
5 – Próximo ao infravermelho	0,851 – 0,879
6 – Infravermelho de Onda Curta 1	1,566 – 1,651
7 – Infravermelho de Onda Curta 2	2,107 – 2,294

Fonte: adaptado de EROS (2022).

A partir da composição de bandas, o processo segue para a amostragem, a construção de um banco de dados para o treinamento do algoritmo de classificação. De acordo com as classes definidas por Souza Jr., *et al.* (2020), foi desenhado um vetor categorizado sobre as áreas com feições características de cada cobertura/uso da terra (Figura 4).

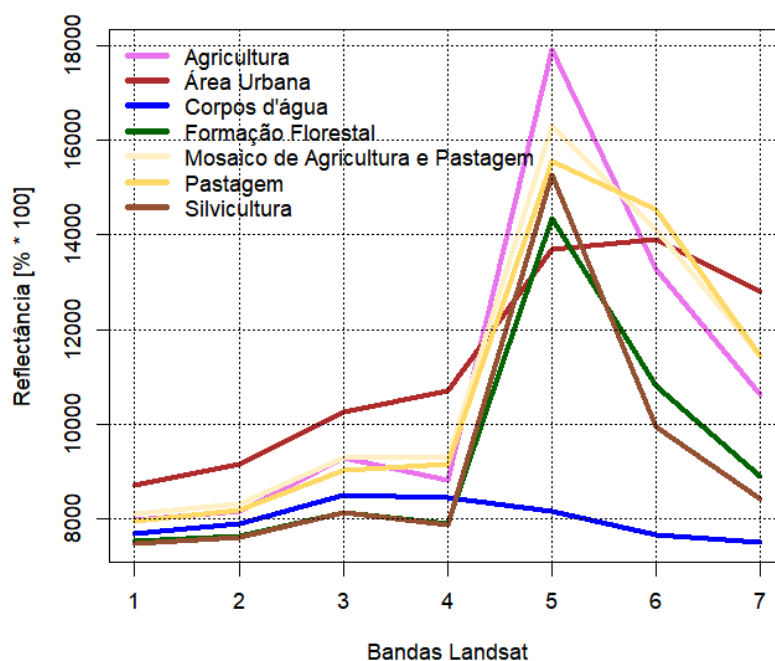
Figura 4 - Vetor categorizado a partir das classes MapBiomias.



Fonte: Autor (2022).

O vetor resultante deste processo contabilizou 1.436 feições (polígonos), contendo 25.577 pixels. As feições em questão foram utilizadas para extrair os valores de reflectância característicos de cada classe, registrados em cada pixel da composição de bandas processada anteriormente, conforme demonstra o gráfico de perfis espectrais (Figura 5).

Figura 5 - Visualização dos perfis espectrais das classes amostradas.



Fonte: Autor (2022).

3.3 AMOSTRAGEM DE ÁGUA E PROCEDIMENTO DE LABORATÓRIO

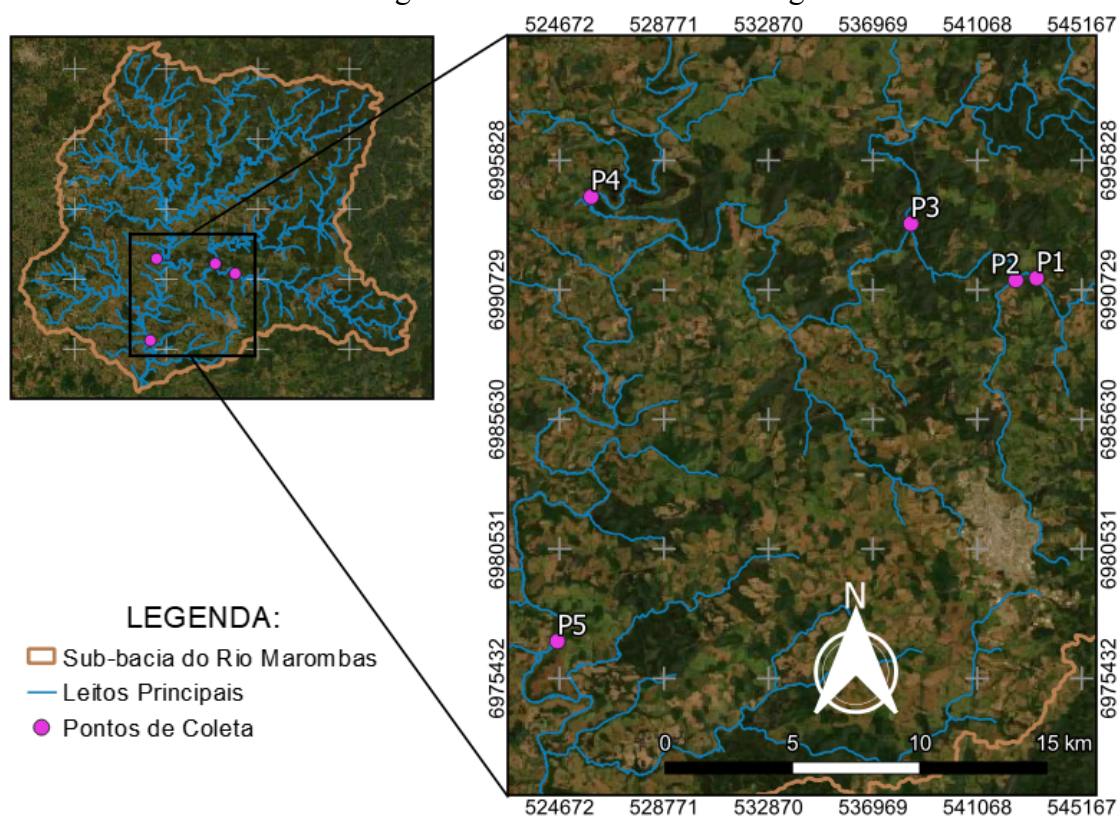
Foram realizadas quatro campanhas de coleta nos pontos descritos, cujas datas foram: 8 de novembro de 2021, 7 de fevereiro de 2022, 9 de maio de 2022 e 13 de agosto de 2022. Os pontos de coleta estão descritos e expostos no Quadro 3 e Figura 6, seguintes.

Quadro 3 - Códigos, áreas correspondentes, descrição e coordenadas geográficas dos pontos de coleta de água.

Código	Área correspondente	Descrição	Coordenadas
P1	Sub-bacia do Alto Marombas	À montante da confluência com o Rio Pessegueirinho, onde é realizada a captação de água para abastecimento público de Curitiba	27°12'4,0"S 50°34'7,8"O
P2	Microbacia do Pessegueirinho	Próximo à foz do Rio Pessegueirinho	27°12'7,7"S 50°34'12,2"O
P3	Sub-bacia do Rio das Pedras	À montante da confluência com o Rio Marombas	27°10'55,8"S 50°36'42,2"O
P4	Sub-bacia do Rio Correntes	À montante da confluência com o Rio Marombas	27°10'22,5"S 50°44'18,5"O
P5	Sub-bacia do Rio Marombas	Passo do Rio Marombas em Brunópolis, próximo à foz (atualmente área alagada da Usina Hidrelétrica São Roque).	27°19'51,2"S 50°45'5,1"O

Fonte: autor (2022)

Figura 6 - Pontos de Coleta de Água.

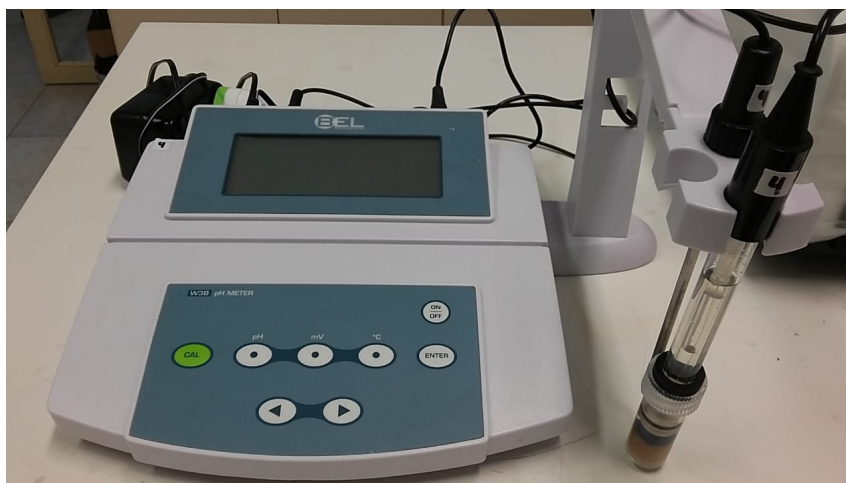


Fonte: processado pelo autor (2022).

A água foi coletada na profundidade de 20 cm e armazenada em recipientes de polipropileno identificados e com capacidade de um litro cada. Para as análises de coliformes termotolerantes foram coletados 250 mL de água em frascos de vidro estéreis. As amostras foram identificadas e acondicionadas em caixa térmica para serem transportadas aos Laboratórios da Universidade Federal de Santa Catarina - *Campus* Curitibanos, para os procedimentos de análise necessários.

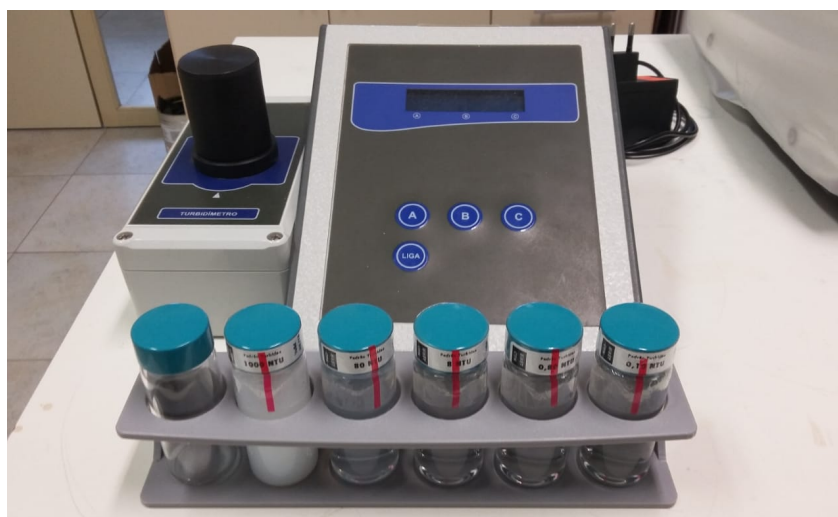
Frascos de vidro de boca estreita, de 60 mL, contendo Timol na concentração de 0,1 g/L, foram utilizados para armazenar amostras de água, após filtrá-la (Whatman GF/F, 0,7 μm de porosidade). Estas amostras foram usadas para determinação de Nitratos por cromatografia iônica (APHA, 2012) em ensaios realizados pela QMC Saneamento - Laboratório de Análises (Florianópolis, SC). A temperatura e a concentração de oxigênio dissolvido (OD) foram determinados com a utilização de uma sonda amperométrica (LUTRON, DO-5519) diretamente na água, nos locais de coleta. As medições foram realizadas em triplicata para cada parâmetro de qualidade. Nos laboratórios foram quantificados o pH e turbidez (TB), com o uso de um pHmetro (BEL, W3B) e turbidímetro (TECNOPON, TB-1000) respectivamente (Figuras 7 e 8).

Figura 7 - pHmetro utilizado nas análises.



Fonte: Autor (2021).

Figura 8 - Turbidímetro utilizado nas análises.



Fonte: Autor (2021).

A avaliação de coliformes termotolerantes (CTT) foi realizada através da técnica de tubos múltiplos, consistindo em testes presuntivos e confirmativos para a detecção de grupos de bactérias coliformes e posteriormente a quantificação propriamente dita de coliformes termotolerantes. Em cada ponto de estudo foram coletadas amostras em triplicata. No teste presuntivo, alíquotas de 10 mL de cada amostra foram dispostas em 5 tubos de ensaio contendo 10 mL de caldo lactosado. Para o teste confirmativo, o meio de cultivo utilizado foi o caldo bile verde brilhante, ao passo que no teste de coliformes termotolerantes, utilizou-se o caldo E.C.. A quantificação de coliformes totais e termotolerantes foi feita através do método do NMP (número mais provável), com limite de confiança de 95% (FUNASA, 2009).

Os sólidos totais (ST), concentração de fósforo total (PT), demanda bioquímica de oxigênio ($DBO_{5,20}$) foram realizados segundo protocolos da Associação Americana de Saúde Pública (APHA, 2012). Para ST, cápsulas de porcelana foram devidamente higienizadas, secas em estufa elétrica (FANEM, 515) por 24 horas, pesadas e identificadas para o desconto de tara (m_i). Após o preparo do material, as amostras coletadas foram vigorosamente agitadas e alíquotas de 50mL foram dispostas nas cápsulas, conduzidas à estufa elétrica por 48 horas. Posteriormente as cápsulas são resfriadas em dessecador e pesadas (m_f) em balança de precisão, sendo o ST expresso em mg/L e calculado conforme segue:

$$ST = \frac{(m_f - m_i) \times 1000}{0,05} \quad (3)$$

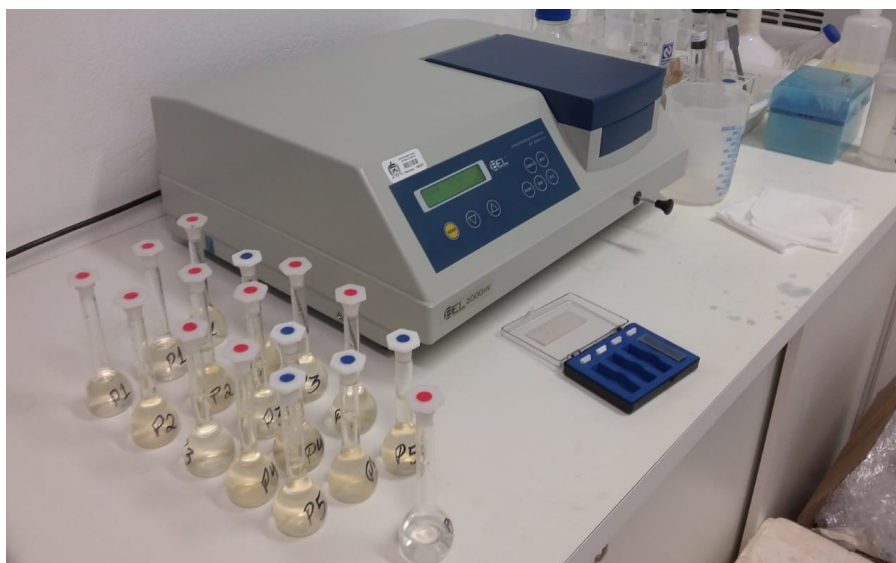
Figura 9 - Cápsulas de porcelana utilizadas nas análises.



Fonte: Autor (2021).

O parâmetro PT foi determinado via Método Colorimétrico do Ácido Vanadomolibdofosfórico. Inicialmente as amostras, em triplicatas, passaram por uma pré-concentração (a partir de 100mL) e por um processo de digestão utilizando persulfato de amônio $[(NH_4)_2S_2O_8]$ e ácido sulfúrico (H_2SO_4 , 30%). O produto da digestão das amostras foi então neutralizado, com auxílio de hidróxido de sódio (NaOH, 1 mol/L) e o indicador de pH fenolftaleína (1%), e transferido para balões volumétricos juntamente com o reagente de cor, uma solução ácida de molibdato e vanadato. Após aguardar 10 minutos, para o desenvolvimento de cor, 3 mL dos balões foram transferidos para cubetas de vidro e seguiram para leitura de absorbância em espectrofotômetro (BEL, SP 2000 UV), no comprimento de onda de 400 nm.

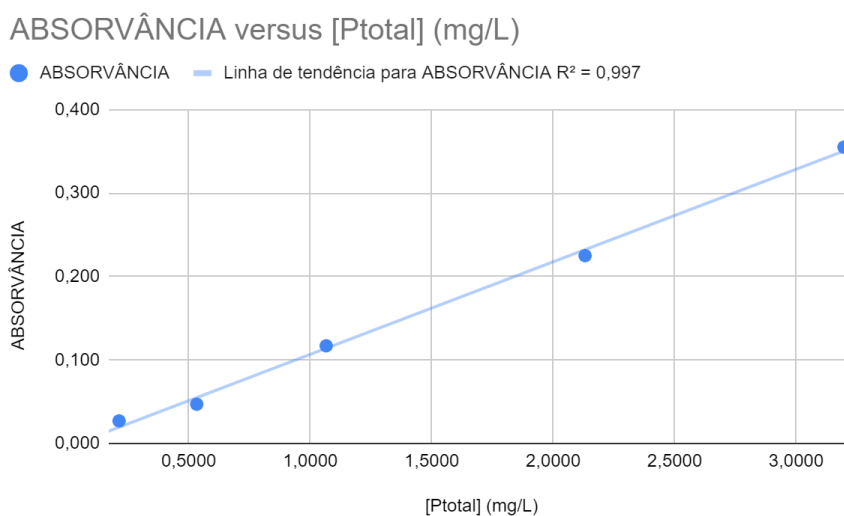
Figura 10 - Balões volumétricos, cubetas de vidro e espectrofotômetro utilizados nas análises.



Fonte: Autor (2021).

O cálculo da concentração de fósforo total presente nas amostras foi realizado a partir de uma curva de calibração. Uma solução padrão de fosfato de sódio ($\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 99% VETEC) foi utilizada para construir a curva com concentrações crescentes de fósforo na forma de fosfato (P-PO_4^{3-}), preparadas com os mesmos procedimentos de digestão e desenvolvimento de cor empregadas nas amostras. Aplicando uma regressão linear aos valores de concentração dos padrões e suas correspondentes leituras de absorvância, calcula-se a concentração de fósforo total das amostras.

Figura 11 - Gráfico com exemplo de uma curva de calibração para P-PO_4^{3-} .



Fonte: Autor (2021).

A qualidade do ajuste do modelo de regressão é demonstrada pelos coeficientes de determinação (R^2) e correlação (R) de Pearson, quantificando a porcentagem da variância explicada pelo modelo e o grau de correlação entre as variáveis estudadas, respectivamente. No exemplo supracitado, considera-se a concentração de fósforo total como variável dependente (y) e a absorbância como variável independente (x) para o modelo de regressão:

$$y = mx + b \quad (4)$$

Tabela 4 - Coeficientes de correlação, determinação, angular e linear da regressão para a curva de calibração exibida na Figura 11.

R	0,998
R^2	0,997
m	8,992
b	0,0412

Fonte: Autor (2021).

Entrando com os valores das leituras de absorbância das amostras na variável independente, é aferida a concentração do analito, sendo necessário ainda ajustar o valor para os volumes utilizados no procedimento:

$$C_a = \frac{(C_c - V_f)}{V_a} \quad (5)$$

Sendo:

C_a = concentração de fósforo total corrigida para os volumes;

C_c = concentração de fósforo total obtida na regressão linear;

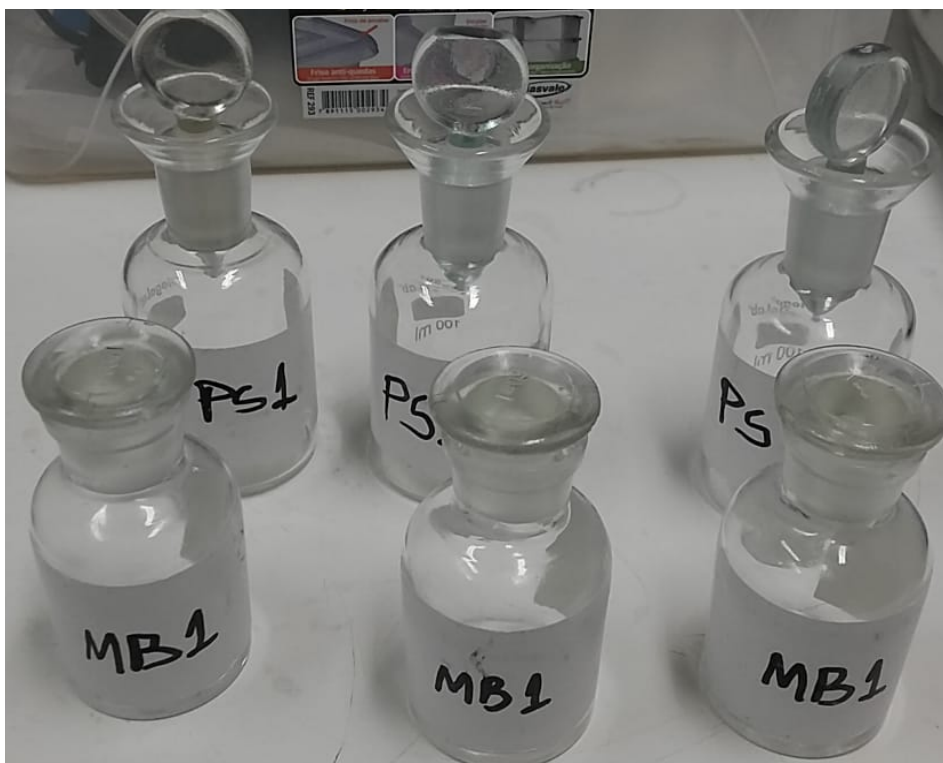
V_f = volume final da solução cuja absorbância foi medida (amostra digerida+reagente de cor);

V_a = volume da amostra utilizada na análise.

Para a determinação de $DBO_{5,20}$ foram utilizados os valores de oxigênio dissolvido (OD) iniciais aferidos a campo e os valores de OD após um período de incubação das amostras, por 5 dias em temperatura de 20°C em frascos adequados, utilizando a mesma sonda amperométrica para as duas medições. A diferença entre os valores iniciais e finais contabilizam a demanda bioquímica de oxigênio:

$$DBO_{5,20} = OD_i - OD_f \quad (6)$$

Figura 12 - Frascos de incubação utilizados na determinação de DBO.



Fonte: Autor (2021).

Figura 13 - Sonda amperométrica utilizada na determinação de OD.



Fonte: Autor (2021).

3.4 RELAÇÃO ENTRE COBERTURA/USO DA TERRA E QUALIDADE DE ÁGUA

Para a investigação da influência das classes de cobertura e uso da terra sobre a qualidade da água foram utilizadas técnicas estatísticas de Análise de Componentes Principais (PCA), Modelos de Regressão Logística Multinomial (RLM) bem como Análise de Desvio via Teste de Wald.

A PCA consiste numa técnica de análise multivariada que objetiva a avaliação de interrelações entre um grande número de variáveis, explicando-as em termos de dimensões denominadas componentes principais. A técnica extrai os componentes a partir de matrizes de covariância e correlação, agrupando as variáveis originais em conjuntos menores permitindo uma melhor visualização das distribuições em mapas perceptuais (SMITH, 2002).

As datas das campanhas de coleta de água e o período correspondente à classificação da área de estudo não permitiram um procedimento de regressão comum. O MapBiomass, referencial que será utilizado na validação da classificação do presente trabalho, gera um produto a cada ano para caracterizar a ocupação das terras do Brasil, ao passo que as análises de água ocorreram a cada três meses. Entretanto, a RLM possibilita modelagens para explicar relações entre uma variável dependente categórica com múltiplos grupos nominais e diversas variáveis independentes contínuas ou discretas (FÁVERO *et al.*, 2009), podendo então ser utilizada para verificar as diferenças nos parâmetros de qualidade da água entre áreas de drenagem ocupadas com classes de cobertura e uso da terra em diferentes proporções.

Todo tratamento estatístico foi conduzido com o *software* R (R CORE TEAM, 2022), linguagem de programação de código aberto amplamente utilizada como ferramenta de análise de dados.

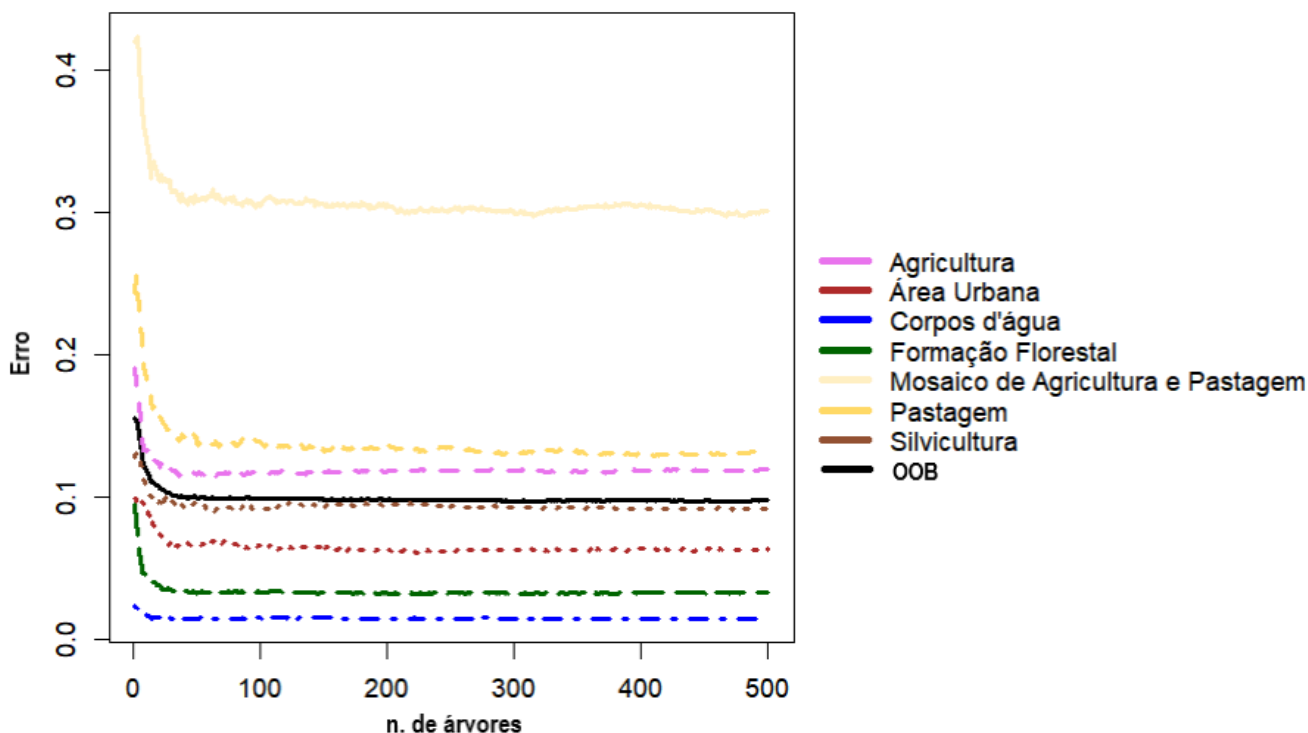
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 COBERTURA E USO DA TERRA

Os dados adquiridos no procedimento de classificação geraram como produto um mapa temático, com códigos de cores conforme Esquema de Classificação do MapBiomias, e encontra-se exposto como APÊNDICE B.

A qualidade do modelo de classificação pode ser ilustrada pela estimativa de erro OOB (*Out of Bag*), recurso do modelo RF em que uma parcela dos dados de treinamento, que não foram utilizados na classificação propriamente dita, aferem a taxa de acerto na identificação das classes. O modelo contou com 500 árvores de decisão (padrão do algoritmo), expressando 90,22% de acerto (OOB *error* = 9,78%). O erro em cada classe de acordo com o número de árvores utilizadas pode ser visualizado na Figura 14.

Figura 14 - Distribuição do erro das classes ao longo do número de árvores de decisão.



Fonte: autor (2022).

As informações dos erros associados ao número de árvores do modelo são especialmente importantes nessa técnica devido a possibilidade de reduzir o número de componentes do algoritmo e conseqüentemente reduzir o custo computacional associado ao processo de classificação, orientando os parâmetros necessários em cada caso.

É observado um valor alto de erro para a classe “Mosaico de Agricultura e Pastagem”, fenômeno esperado, visto que os mosaicos representam áreas muito parecidas em composição vegetal e distribuição espacial captadas pelos sensores dos satélites, tratando-se de um agrupamento de valores de reflectância intermediário às classes “Agricultura” e “Pastagem” (como observado no perfil espectral, Figura 4). O modelo também pode ser avaliado pela matriz de confusão gerada pelo algoritmo, demonstrada na Tabela 5, expressando os votos unitários de cada árvore de decisão utilizada na classificação.

Tabela 5 - Matriz de confusão gerada a partir do número de pixels no modelo de classificação RF, para a sub-bacia do Marombas.

	Agricultura	Área Urbana	Corpos d'água	Formação Florestal	Mosaico de Agricultura e Pastagem	Pastagem	Silvicultura	erro (%)
Agricultura	4577	45	3	10	454	107	4	0,119808
Área Urbana	15	1769	3	9	74	17	2	0,063526
Corpos d'água	9	11	3960	14	8	6	11	0,014680
Formação Florestal	11	0	5	5624	21	12	142	0,032846
Mosaico de Agricultura e Pastagem	324	67	12	21	1944	400	13	0,300971
Pastagem	35	14	11	20	353	2862	3	0,132201
Silvicultura	4	0	1	131	50	50	2339	0,091650

Fonte: autor (2022).

A partir do mapa produzido, com auxílio da extensão do QGIS, *Landscape Ecology Statistics* (LecoS) desenvolvido por Jung (2016), foram extraídos valores de área em metros quadrados, convertidos para áreas em hectares para cada classe identificada bem como suas proporções em relação a cada subdivisão componente da Sub-bacia do Rio Marombas, conforme Tabela 6.

Tabela 6 - Pontos de coleta de água, áreas e proporções ocupadas com as classes de cobertura e uso para as áreas de drenagem estudadas.

P1 - Sub-bacia do Alto Marombas			P2 - Microbacia do Pessegueirinho		
<i>Classe</i>	<i>Área (ha)</i>	<i>Proporção (%)</i>	<i>Classe</i>	<i>Área (ha)</i>	<i>Proporção (%)</i>
Agricultura	1565,69	3,37	Agricultura	301,33	7,09
Área Urbana	976,40	2,10	Área Urbana	454,98	10,7
Corpos d'água	429,92	0,93	Corpos d'água	103,44	2,43
Formação Florestal	20300,00	43,69	Formação Florestal	1280,34	30,11
Mosaico de Agricultura e Pastagem	4210,72	9,06	Mosaico de Agricultura e Pastagem	877,67	20,64
Pastagem	7220,32	15,54	Pastagem	541,18	12,73
Silvicultura	11800,00	25,30	Silvicultura	692,90	16,30
TOTAL (ha)	46503,05		TOTAL	4251,84	
P3 - Sub-bacia do Rio das Pedras			P4 - Sub-bacia do Rio Correntes		
<i>Classe</i>	<i>Área (ha)</i>	<i>Proporção (%)</i>	<i>Classe</i>	<i>Área (ha)</i>	<i>Proporção (%)</i>
Agricultura	2690,95	5,61	Agricultura	12731,48	7,47
Área Urbana	1275,88	2,66	Área Urbana	10853,44	6,37
Corpos d'água	995,41	2,07	Corpos d'água	4023,85	2,36
Formação Florestal	15531,17	32,37	Formação Florestal	55761,41	32,72
Mosaico de Agricultura e Pastagem	5165,17	10,76	Mosaico de Agricultura e Pastagem	27577,65	16,18
Pastagem	8254,92	17,20	Pastagem	19776,96	11,61
Silvicultura	14072,45	29,33	Silvicultura	39675,27	23,28
TOTAL (ha)	47985,95		TOTAL (ha)	170400,06	
P5 - Sub-bacia do Rio Marombas (área total)					
<i>Classe</i>	<i>Área (ha)</i>	<i>Proporção (%)</i>			
Agricultura	35797,67	9,74			
Área Urbana	19382,86	5,27			
Corpos d'água	9081,37	2,47			
Formação Florestal	118141,58	32,15			
Mosaico de Agricultura e Pastagem	60237,05	16,39			
Pastagem	44260,74	12,04			
Silvicultura	80615,65	21,94			
TOTAL (ha)	367516,92				

Fonte: autor (2022)

Destaca-se na tabela acima o segmento P5, representando o ponto de convergência de todos os mananciais estudados, em que são expostos os valores de áreas e proporções da totalidade da Sub-bacia do Rio Marombas quanto às classes utilizadas na classificação. É importante salientar que, no ponto de coleta em questão, houveram significativas alterações dos arredores por consequência da construção da Usina Hidrelétrica São Roque (Figuras 15 e Figura 16).

Figura 15 - P5 antes do alagamento consequente da barragem São Roque (07/02/2021).



Fonte: autor (2021).

Figura 16 - P5 após alagamento consequente da barragem São Roque (13/08/2022).



Fonte: autor (2022)

No trabalho realizado por Ten Caten, Safanelli e Ruiz (2015) em que foram utilizadas bandas espectrais do satélite *Landsat 5* e algoritmo de classificação de árvore de decisão, foi relatado que no ano de 2011 a Sub-bacia do Rio Marombas contabilizava 7,1% da cobertura da área estudada na classe de Agricultura e 18,6% na classe de Silvicultura. O presente estudo identificou uma área de 9,7% de uso para a Agricultura e 21,9% para a Silvicultura, o que representa um incremento no uso da terra em 36,62% para a agricultura e de 17,74% para silvicultura nos últimos 11 anos na Sub-bacia do Rio Marombas. É importante salientar que o trabalho referenciado foi publicado anteriormente à primeira coleção do MapBiomias e utilizou também um modelo digital de elevação com resolução inferior (SRTM), não havendo necessariamente a mesma nomenclatura e acurácia em comparação com o presente estudo.

4.2 QUALIDADE DA ÁGUA

Os dados adquiridos nas análises de água encontram-se organizados na Tabela 7, apresentando valores médios e desvios para cada um dos parâmetros avaliados, nas datas de coletas realizadas e discriminadas para cada ponto estudado, bem como os valores limitantes para águas de Classe 2, segundo a Resolução nº 357/2005 do Conselho Nacional do Meio Ambiente. Os corpos de água doce de Classe 2 são indicados para o uso como abastecimento público após tratamento convencional, à proteção de comunidades aquáticas, à recreação de contato primário, irrigação de algumas espécies, à aquicultura e atividades de pesca.

Tabela 7 - Resultados, desvios, médias dos parâmetros analisados e valores de referência para águas de Classe 2 (CONAMA, 2005).

	RES. 357/2005 CONAMA Classe 2	08/11/2021	07/02/2022	09/05/2022	13/08/2022	MÉDIA (DESV. PAD)
P1 - Rio Marombas (ponto de captação para abastecimento de Curitibaanos)						
OD (mg/L)	≥ 5,0	7,90	7,50	8,90	9,03	8,33 (±0,75)
DBO_{5,20} (mg/L)	≤ 5,0	1,93	1,83	2,03	2,03	1,96 (±0,10)
T (°C)	-	19,30	21,10	14,40	12,00	16,70 (±4,22)
TB (UNT)	≤ 100	15,97	15,47	14,17	13,97	14,89 (±0,98)
pH	6,0 ~ 9,0	7,16	7,04	6,21	7,20	6,90 (±0,47)
ST (mg/L)	-	41,33	36,67	94,67	32,00	51,17 (±29,75)
PT (mg/L)	≤ 0,1	0,29	0,29	0,71	0,36	0,41 (±0,20)
CTT (NMP/100mL)	≤ 1000	886,67	745,00	215,00	673,33	630,00 (±290,52)
Nitratos (mg/L)	≤ 10,0	0,29	0,26	1,46	1,17	0,80 (±0,61)

P2 - Rio Pessegueirinho						
OD (mg/L)	≥ 5,0	7,17	6,40	7,87	8,10	7,38 (±0,77)
DBO _{5,20} (mg/L)	≤ 5,0	4,47	1,23	1,80	1,63	2,28 (±1,47)
T (°C)	-	18,60	19,20	14,57	13,17	16,38 (±2,97)
TB (UNT)	≤ 100	27,00	38,67	41,00	27,67	33,58 (±7,28)
pH	6,0 ~ 9,0	7,34	7,52	6,73	7,75	7,33 (±0,44)
ST (mg/L)	-	64,67	77,33	76,00	46,67	66,17 (±14,19)
PT (mg/L)	≤ 0,1	0,32	0,84	1,24	0,29	0,67 (±0,46)
CTT (NMP/100mL)	≤ 1000	103,00	830,00	516,67	1.100,00	637,42 (±428,66)
Nitratos (mg/L)	≤ 10,0	4,06	3,75	2,57	0,78	2,79 (±1,49)
P3 - Rio das Pedras						
OD (mg/L)	≥ 5,0	7,57	7,07	8,83	8,70	8,04 (±0,86)
DBO _{5,20} (mg/L)	≤ 5,0	1,43	1,37	2,15	1,80	1,69 (±0,36)
T (°C)	-	21,00	22,00	15,20	13,03	17,81 (±4,37)
TB (UNT)	≤ 100	11,30	19,43	14,10	18,47	15,83 (±3,81)
pH	6,0 ~ 9,0	7,25	7,43	6,92	7,18	7,20 (±0,21)
ST (mg/L)	-	38,00	35,33	33,53	40,00	36,72 (±2,86)
PT (mg/L)	≤ 0,1	0,42	0,21	0,34	ND	0,24 (±0,18)
CTT (NMP/100mL)	≤ 1000	32,67	1.100,00	151,67	570,00	463,58 (±482,82)
Nitratos (mg/L)	≤ 10,0	0,77	0,20	1,11	0,22	0,58 (±0,44)
P4 - Rio Correntes						
OD (mg/L)	≥ 5,0	8,43	7,60	8,70	9,23	8,49 (±0,68)
DBO _{5,20} (mg/L)	≤ 5,0	2,70	2,17	2,05	2,30	2,30 (±0,28)
T (°C)	-	22,83	23,47	15,33	13,50	18,78 (±5,10)
TB (UNT)	≤ 100	17,13	68,00	31,33	47,67	41,03 (±21,88)
pH	6,0 ~ 9,0	7,72	7,52	7,01	7,37	7,41 (±0,30)
ST (mg/L)	-	30,67	84,67	78,00	64,00	64,33 (±24,04)
PT (mg/L)	≤ 0,1	0,28	0,79	0,71	0,17	0,49 (±0,31)
CTT (NMP/100mL)	≤ 1000	57,33	733,33	616,67	520,00	481,83 (±296,14)
Nitratos (mg/L)	≤ 10,0	1,36	0,50	0,68	0,64	0,80 (±0,38)
P5 - Rio Marombas (próximo à foz)						
OD (mg/L)	≥ 5,0	7,43	7,00	8,33	9,67	8,11 (±1,18)
DBO _{5,20} (mg/L)	≤ 5,0	0,97	1,83	2,40	3,33	2,13 (±0,99)
T (°C)	-	22,40	23,63	16,73	14,03	19,20 (±4,57)
TB (UNT)	≤ 100	12,17	42,00	26,00	45,67	31,46 (±15,44)
pH	6,0 ~ 9,0	7,57	7,55	6,98	7,42	7,38 (±0,28)
ST (mg/L)	-	26,00	62,00	30,00	56,00	43,50 (±18,14)
PT (mg/L)	≤ 0,1	0,25	0,81	1,18	0,15	0,60 (±0,49)
CTT (NMP/100mL)	≤ 1000	125,33	813,33	745,00	570,00	563,42 (±309,51)
Nitratos (mg/L)	≤ 10,0	1,41	0,80	0,57	0,53	0,83 (±0,41)

OD = oxigênio dissolvido; DBO = demanda bioquímica de oxigênio; T = temperatura; TB = turbidez; ST = sólidos totais; PT = fosfato total; CTT = coliformes termotolerantes. ND = “não detectado”. Fonte: Autor (2022).

Na tabela acima estão sinalizados os valores em desacordo com a Resolução CONAMA 357/2005. Observa-se com destaque o parâmetro Fósforo Total que, em todos os pontos de coletas, apresentou valores superiores ao previsto pela regulamentação (valores médios em mg/L: P1 = 0,41; P2 = 0,67; P3 = 0,24; P4 = 0,49; P5 = 0,60). Presente em águas superficiais em diferentes formas, o fósforo pode ter origem natural, oriundo da decomposição de matéria orgânica e lixiviação de minerais presentes em rochas fosfatadas, mas também podem ter origem antropogênica, resultante de escorrências de terras agrícolas fertilizadas e de falhas no tratamento de águas residuais (VON SPERLING, 1996).

O maior valor médio encontrado durante o período de coletas foi obtido em P2 (0,67 mg/L), o que representa uma concentração mais de seis vezes superior ao limite determinado pela legislação. Também em P2, foi registrada a maior concentração, alcançando 1,24 mg/L na campanha de coleta do dia 07/02/2022. O maior percentual de ocupação urbana, encontra-se na área de drenagem correspondente a microbacia do Rio Pessegueirinho, cuja qualidade das águas está representada no P2. Potenciais fontes de fósforo podem estar associadas a despejos urbanos, como drenagem pluvial e efluentes domésticos, sendo fato que a coleta e tratamento de esgoto de Curitiba foi iniciada apenas no final do mês de junho de 2021. Ainda em “primeira etapa”, o sistema conta com uma rede coletora de aproximadamente 39 km e uma Estação de Tratamento apta a tratar até 40 litros por segundo, atendendo apenas cerca de 30% do município (CASAN, 2021).

Os valores encontrados em P1, P3 e P4 podem representar impactos dos cultivos desenvolvidos nas áreas correspondentes, evidenciados pela proporção de atividades agrossilvipastoris (classes “Silvicultura”, “Agricultura”, “Pastagem” e “Mosaico de Agricultura e Pastagem”) que ocupam mais da metade da cobertura da terra (53,28%, 62,90% e 58,55% respectivamente) de acordo com a classificação conduzida na realização deste estudo. Tomando o ponto P5 como região de convergência de todas as áreas estudadas, nota-se que ao longo trajeto até o exutório da sub-bacia há pouca depuração nas concentrações de PT (segunda maior média aferida, 0,60 mg/L) e de Nitratos (segunda maior média aferida, 0,83 mg/L).

A partir dos parâmetros obtidos para as águas dos rios ou trechos estudados foi calculado o Índice de Qualidade de Água (IQA), cujos resultados para cada campanha e ponto de coleta, suas médias e classificação estão representados na Tabela 8. Considerando o período estudado, os pontos de coleta P1, P2, P3 e P4 foram enquadrados na classe "Médio", ao passo que o ponto de coleta próximo ao exutório da sub-bacia, P5, foi classificado como “Ruim”.

Tabela 8 - IQAs para campanhas, locais de coleta e valores médios.

	08/11/2021	07/02/2022	09/05/2022	13/08/2022	Média
P1	51,50	51,56	47,18	50,86	50,27
P2	69,93	45,49	44,66	49,86	52,49
P3	78,86	51,66	51,07	52,95	58,63
P4	77,56	46,24	48,42	50,02	55,56
P5	52,21	47,45	47,06	50,16	49,22

Azul = “Excelente”, Verde = “Bom”, Amarelo = “Médio”, Laranja = “Ruim” e Vermelho = “Muito Ruim”.
Fonte: Autor (2022).

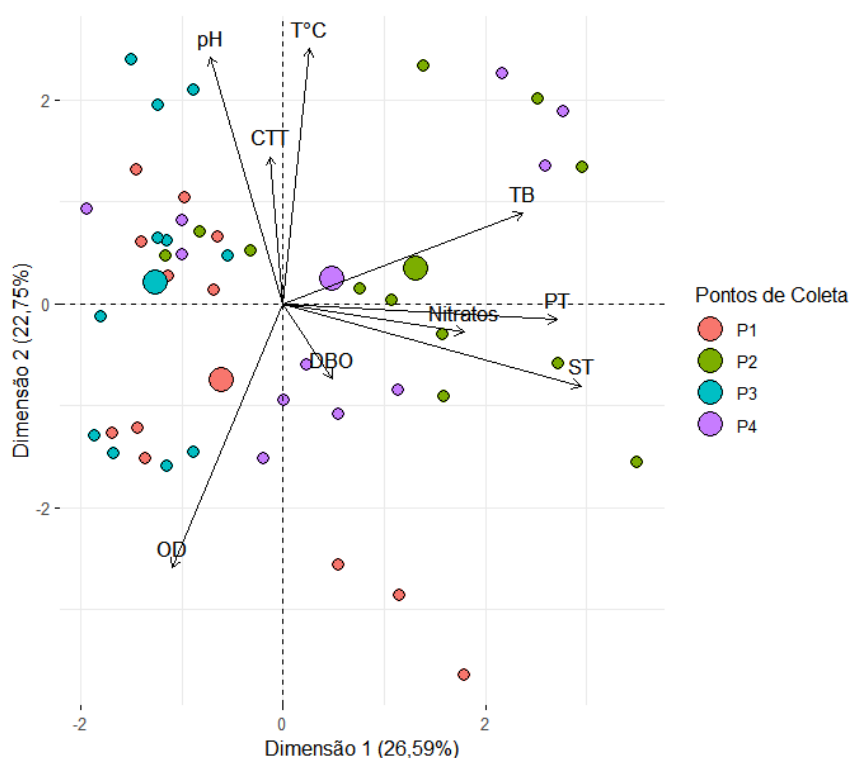
Dentre os parâmetros estudados, os valores de qualidade que mais contribuíram para a redução dos IQAs em todos os locais de coleta foram CTT, PT e TB, que apresentaram valores de $q_i < 70$. Os valores q_i calculados para cada parâmetro, em cada ponto e data de coleta estão expostos no APÊNDICE C. Panoramas similares são relatados por estudo de Magalhães Jr., Lopes e Macedo (2019), em que regressões múltiplas acusaram a associação positiva entre coliformes, Florestas Plantadas e Agricultura ou Pastagem ($R^2 = 0,40$), Fósforo total associado positivamente às áreas de Agricultura ou Pastagem ($R^2 = 0,41$) além de valores de IQA associados negativamente às áreas de Agricultura ou Pastagem ($R^2 = 0,38$). Estudos conduzidos por Santos, Cordeiro e Vieira (2021) relatam significativa correlação (0,40) entre Turbidez e áreas ocupadas com Mosaicos de Agricultura e Pastagem, como também influência expressiva dos parâmetros coliformes termotolerantes, sólidos totais, turbidez e fósforo em processos de degradação da qualidade da água, apresentando IQAs que variam de “Ruim” a “Bom”.

4.3 COBERTURA/USO DA TERRA *VERSUS* QUALIDADE DA ÁGUA

Para melhor visualização dos dados em relação aos pontos de coleta, foi realizada uma análise de componentes principais (PCA), demonstrando os parâmetros estudados em autovetores, ao longo de dois eixos de componentes principais (dimensões) que explicam as maiores contribuições do conjunto de dados sobre a variância. A partir da PCA foram gerados gráficos (mapas perceptuais) com as distribuições dos valores obtidos nos pontos de coleta, organizados por cores, juntamente com setas (autovetores) de diferentes tamanhos, apontando para diferentes direções, representando os parâmetros avaliados. A direção e o tamanho dos autovetores representam a magnitude de contribuição à variância para cada componente, tal como o ângulo entre autovetores e componentes representa a correlação entre as variáveis

estudadas. Autovetores apontando para os mesmo quadrantes estão correlacionados positivamente, autovetores apontados para quadrantes opostos estão correlacionados negativamente. O agrupamento dos pontos em relação aos quadrantes e a distância da origem dos eixos indicam similaridades entre si, em relação às variáveis atribuídas a cada autovetor. As médias de cada agrupamento são representadas por pontos maiores (centróides), auxiliando na visualização das similaridades e diferenças dos agrupamentos conforme demonstrado na Figura 17.

Figura 17 - Distribuição dos pontos de coleta sobre os eixos dos componentes principais.



Fonte: autor (2022).

A variância explicada por cada dimensão, suas porcentagens e percentuais acumulados são expostos na Tabela 9. As duas primeiras dimensões (componentes principais) foram capazes de explicar 49,34% da variância dos dados. Na Tabela 10 são esclarecidas as importâncias de cada parâmetro para os componentes principais.

Tabela 9 - Porcentagem da variância intrínseca em cada dimensão.

	Dim. 1	Dim. 2	Dim. 3	Dim. 4	Dim. 5	Dim. 6	Dim. 7	Dim. 8	Dim. 9
Variância	2,393	2,048	1,563	1,045	0,789	0,500	0,304	0,221	0,139
% da variância	26,592	22,753	17,361	11,611	8,762	5,553	3,373	2,456	1,539
% acumulada	26,592	49,345	66,706	78,317	87,079	92,632	96,005	98,461	100,000

Fonte: autor (2022).

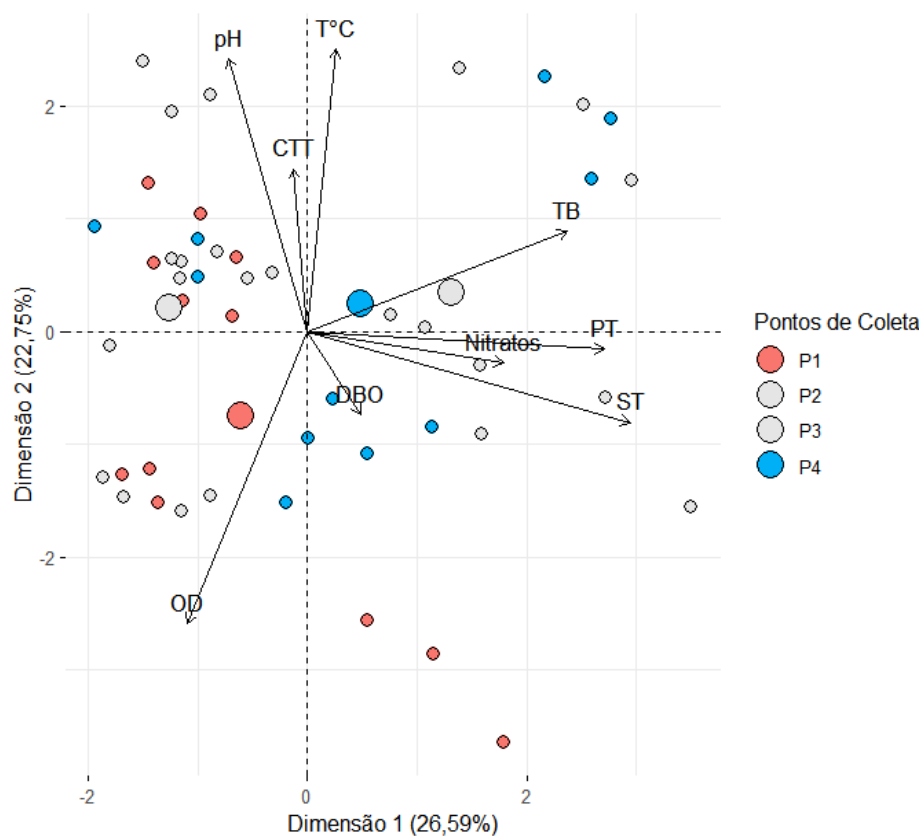
Tabela 10 - Cargas de contribuição de cada parâmetro sobre os componentes principais.

	Dim. 1	Dim. 2
OD	-0,327	-0,773
DBO	0,145	-0,221
T°C	0,079	0,747
TB	0,707	0,264
pH	-0,214	0,722
ST	0,878	-0,241
PT	0,809	-0,048
CTT	-0,038	0,430
Nitratos	0,535	-0,084

Fonte: autor (2022).

Retomando a análise do mapa perceptual, é possível colocar em evidência pontos de coleta diferentes para fins de comparação. Na figura 18 são destacados o ponto P1, onde é realizada a captação de água para o abastecimento de Curitiba, e P4 correspondendo à sub-bacia estudada com maior proporção de uso da terra voltado às classes “Agricultura”, “Pastagem” e “Mosaico de Agricultura e Pastagem” (35,26%).

Figura 18 - Distribuição de P1 e P4 destacada sobre os eixos dos componentes principais.



Fonte: autor (2022).

As distribuições nos gráficos demonstram indicativos de maiores valores de Nitratos, PT, TB, ST e DBO para a área com maior ocupação agropecuária.

O enriquecimento de ecossistemas aquáticos com espécies de nitrogênio e fósforo são copiosamente mencionados em literatura como grandes responsáveis por eutrofização e deterioração da qualidade da água (BERLANDA *et al.*, 2021; EMÍDIO, 2012; SIMEDO *et al.*, 2018; TANIWAKI *et al.*, 2017; VON SPERLING, 1996).

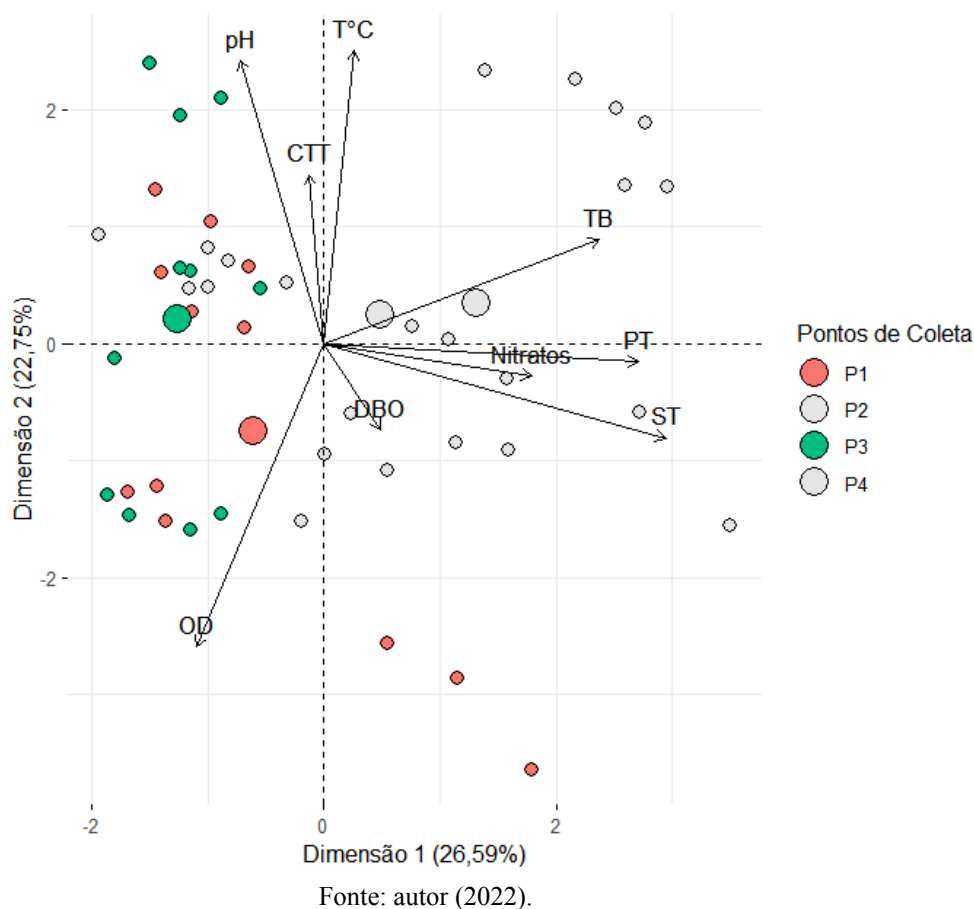
A turbidez, por sua vez, associa-se aos processos de eutrofização dos corpos hídricos principalmente no que se relaciona ao aporte de oxigênio do sistema. Em águas com valores de turbidez elevados, as algas que se encontram em maior profundidade deixam de receber luz, reduzindo ou até cessando a atividade fotossintética, acabando por morrer e entrar em decomposição. Com a perda da vegetação aquática submersa, o alimento, o habitat e o oxigênio que seria ofertado pela fotossíntese desaparecem, comprometendo a dinâmica do ecossistema e assim a qualidade da água (EMÍDIO, 2012).

Quanto aos sólidos totais, sabe-se que este relaciona-se ao acúmulo de cargas poluidoras lançadas por efluentes e ao aporte de cargas poluidoras difusas provenientes do escoamento superficial (GRIECO *et al.*, 2017).

A Demanda Bioquímica de Oxigênio é um parâmetro-chave, demonstrativo da qualidade sanitária e ambiental do ecossistema. A dinâmica de concentrações e consumo de oxigênio dissolvido são comumente utilizadas para se estimar o material orgânico degradado por microrganismos aeróbicos. Quanto mais elevadas as concentrações de material orgânico, menores os valores de oxigênio disponíveis no meio, levando à perda de biodiversidade e à degradação de ambientes aquáticos (POERSCH, 2021).

Não obstante, a sub-bacia do Rio Correntes (P4) cobre quase metade da área total da sub-bacia do Rio Marombas, havendo a possibilidade de que as diferenças entre os parâmetros avaliados sejam influenciados fortemente em função de suas dimensões. Buscando melhor coerência nas investigações acerca da cobertura e uso da terra e a influência sobre a qualidade da água, são postos em comparação os pontos P1 e P3, representando os segmentos mais parecidos em área total (46503,05 ha e 47985,95 ha, respectivamente). A sub-bacia do Alto Marombas (P1) apresenta 53,28% de sua área coberta pelas classes “Agricultura”, “Pastagem”, “Mosaico de Agricultura e Pastagem” e “Silvicultura” ao passo que a Sub-bacia do Rio das Pedras contabiliza 62,90% de sua cobertura para as mesmas classes. Na Figura 19 são destacados os referidos pontos no mapa perceptual da PCA.

Figura 19 - Distribuição de P1 e P3 destacada sobre os eixos dos componentes principais.



No gráfico acima, observam-se indicativos de diferenças para CTT e pH entre os pontos P1 e P3, contudo há proximidade dos centróides e do agrupamento geral das distribuições, exigindo melhor exploração dos dados para inferências mais assertivas.

Buscando aprofundar a análise dos dados, foi conduzida uma modelagem de Regressão Logística Multinomial tomando P1 como nível de referência.

$$f(y) = \frac{1}{1+e^{-(y)}} \quad (7.1)$$

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n \quad (7.2)$$

Sendo:

$y = \ln\left(\frac{p}{1-p}\right)$ da variável categórica dependente;

β_0 = intercepto;

β_n = coeficientes estimados;

x_n = variáveis independentes;

O processo de ajuste, a composição das variáveis presentes no modelo, foi orientado pelo Teste de Wald para avaliar os parâmetros que apresentaram diferença estatística significativa em intervalo de confiança de 90%. O modelo mínimo apresentou um coeficiente de determinação ajustado (NAGELKERKE, 1991) $R^2 = 0,87$, acusando diferenças para TB ($p < 0,9$), CTT ($p < 0,05$) e pH ($p < 0,01$) conforme exposto na Tabela 11.

Tabela 11 - Resultados do modelo RLM e Teste de Wald.

	Coefficiente	Erro Padrão	valor-z	valor-p
Intercepto	-36,626	0,088	-415,380	< 0,01
TB	0,546	0,307	1,779	0,0753
pH	4,276	0,546	7,831	< 0,01
CTT	-0,00384	0,00179	-2,144	0,0320

Fonte: autor (2022).

Deve-se levar em consideração que a variável dependente da RLM é expressa em função logarítmica (conforme fórmulas 7.1 e 7.2), sendo necessária o cálculo de sua função inversa, exponenciação, para interpretação dos coeficientes estimados das variáveis que apresentaram diferenças significativas entre P1 (referencial) e P3. Os coeficientes da RLM são denominados “razão de chance” ou “*odds ratio*” (O.R.) contabilizando para TB, $e^{0,546} = 1,726$, para pH, $e^{4,276} = 71,952$ e para CTT, $e^{-0,00384} = 0,996$.

Finalmente, interpreta-se que o ponto P3 (correspondente à sub-bacia do Rio das Pedras) apresentou tendências para maiores valores de turbidez e pH. Inversamente, a concentração de coliformes termotolerantes apresentou maior chance para valores menores em relação ao P1 (correspondente à sub-bacia do Alto Marombas).

Kaushal *et al.* (2018), relatam processos de alcalinização em águas superficiais, associando estas alterações de pH a poluição difusa de origem agrícola, a partir de contribuições significativas de carbonatos e cátions (cálcio, magnésio e potássio) oriundos de calagem e fertilizantes. Os autores mencionam ainda que a aplicação inadequada de fertilizantes pode acarretar em nitrificação e conseqüentemente na aceleração de intemperismo do solo, contribuindo para a deposição de cátions em corpos d’água, alterando os valores de pH. Dados coletados entre os anos de 2000 e 2018 foram utilizados por Holopainen e Lehtikoinen (2022) para avaliações químicas de água e demonstraram relações positivas entre áreas ocupadas com cultivos e valores de pH, bem como maiores valores de turbidez quando as paisagens sofreram deflorestamento.

Levando em consideração as maiores chances de encontrar maiores concentrações de coliformes termotolerantes em P1, o acompanhamento posterior é indicado para aprofundar as investigações da variação desses valores ao longo do tempo e das prováveis fontes de contaminação, tendo em vista as preocupações em relação a qualidade da água neste local, uma vez que trata-se do ponto de captação de água para o abastecimento do município de Curitiba.

5 CONCLUSÃO

Os esforços direcionados para a Classificação de Cobertura e Uso da Terra esclarecem que a ocupação majoritária da sub-bacia hidrográfica do Rio Marombas é voltada às atividades produtivas ligadas à agricultura, pecuária e silvicultura, alcançando mais de 60% da cobertura total da terra.

Os Índices de Qualidade de Água determinados variaram entre “Bom” e “Ruim”, valor máximo de 78,86 e valor mínimo de 45,49, demonstrando expressiva sensibilidade dos corpos d’água aos potenciais poluidores presentes na sub-bacia, apresentando valores alterados de coliformes termotolerantes, turbidez e fósforo total, reduzindo os valores dos IQAs em todas as áreas estudadas ao longo das campanhas de coleta realizadas.

Apesar das áreas de drenagem avaliadas apresentarem dimensões diferentes, foi possível investigar o impacto das atividades agrossilvipastoris sobre a qualidade da água, comparando duas sub-bacias de áreas similares com amparo de técnicas de estatística multivariada.

Durante o período de realização deste trabalho foram detectadas relações significativas em área com maior ocupação das classes de cobertura/uso da terra “Agricultura”, “Pastagem”, “Mosaico de Agricultura e Pastagem” e “Silvicultura” para com os parâmetros de qualidade da água pH e turbidez, ao comparar as Sub-bacias do Rio das Pedras e do Alto Marombas. Estes resultados indicam a necessidade de aprimoramento nas técnicas voltadas às atividades produtivas, a importância de um olhar mais afinado para os processos de gestão de recursos hídricos e de uso da terra, bem como o constante monitoramento das águas adjacente às alterações de paisagem recorrentes, para a gestão integrada de recursos hídricos.

Buscando contribuir com o aproveitamento sustentável dos recursos naturais, sugere-se que trabalhos futuros sejam desenvolvidos no monitoramento e avaliação de impactos ambientais, considerando outras abordagens na adequação de áreas de estudo, aplicando técnicas de classificação direcionadas ao estado de conservação de matas ciliares e demais áreas de preservação permanente, como áreas de cabeceira das bacias hidrográficas e das nascentes dos mananciais que estão sujeitos aos potenciais poluidores oriundos das atividades agrícolas, silvícolas e da pecuária. Diferentes abordagens estatísticas também devem ser exploradas, visando inferências mais robustas e compreensíveis, informando a comunidade acadêmica e a sociedade no intuito de incentivar a participação da população junto aos órgãos colegiados de gestão de recursos naturais como os Comitês de Bacias Hidrográficas.

REFERÊNCIAS

- ANA - Agência Nacional de Águas. **Índice de qualidade das águas**. 2009. Disponível em: <http://pnqa.ana.gov.br/indicadores-indice-aguas.aspx#_ftn1>
- APHA - American Public Health Association. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. ed. 22 Washington: American Public Health Association, 2012.
- AQUASTAT - Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Global Information System on Water and Agriculture**. 2022. Disponível em: <https://tableau.apps.fao.org/views/ReviewDashboard-v1/country_dashboard?%3Aembed=y&%3AisGuestRedirectFromVizportal=y>
- ASF DAAC. 2015. ALOS PALSAR **Radiometric Terrain Corrected high resolution**. Includes Material © JAXA/METI 2007. Disponível em: <<https://asf.alaska.edu/data-sets/sar-data-sets/alos-palsar>>
- BERLANDA, A. et al. Avaliação temporal e espacial da qualidade das águas superficiais da bacia hidrográfica do rio Desquite, Santa Catarina. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 26, p. 45-51, 2021. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/esa/a/3kNPCbHRzyV8QKqcBcmkcXb/abstract/?lang=pt>>
- BRASIL. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19433.htm>
- BREIMAN, L. Random forests. **Machine learning**, v. 45, n. 1, p. 5-32, 2001. Disponível em: <<https://link.springer.com/content/pdf/10.1023/A:1010933404324.pdf>>
- BROWN, R. et al. A water quality index - crashing the psychological barrier. In: THOMAS, W. A. (Ed.) **Indicators of environmental quality**. New York: Plenum Press, p. 173 - 182, 1972. Disponível em: <https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4684-2856-8_15>
- CASAN - COMPANHIA CATARINENSE DE ÁGUAS E SANEAMENTO. **CASAN inicia tratamento de esgoto em Curitibaanos**. Notícias. 2021. Disponível em: <<https://www.casan.com.br/noticia/index/url/casan-inicia-tratamento-de-esgoto-em-curitibaano#0>>
- CENGIZ, A. et al. Comparison between random forest and support vector machine algorithms for LULC classification. **International Journal of Engineering and Geosciences**, v. 8, n. 1, p. 1-10. Disponível em: <<https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/1943956>>
- CONAMA. Resolução N. 357 de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação de 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**. Disponível em: <http://pnqa.ana.gov.br/Publicacao/RESOLUCAO_CONAMA_n_357.pdf>
- DE MELLO, K. et al. Multiscale land use impacts on water quality: Assessment, planning, and future perspectives in Brazil. **Journal of Environmental Management**, v. 270, p. 110879, 2020. Disponível em: <http://lerf.eco.br/img/publicacoes/mello_et_al_land_use_water_quality_2020.pdf>

EMÍDIO, V. J. G. **A problemática do fósforo nas águas para consumo humano e águas residuais e soluções para o seu tratamento**. 2012. 59 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente) - Universidade do Algarve, Faro, Portugal, 2012. Disponível em: <<https://sapiencia.ualg.pt/handle/10400.1/3154>>

EROS - Earth Resources Observation And Science Center. **Landsat 9 Data Users Handbook**. 2022. Disponível em: <<https://www.usgs.gov/media/files/landsat-9-data-users-handbook>>

FÁVERO, L. P. L. et al. **Análise de dados: modelagem multivariada para tomada de decisões**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009. Disponível em: <<https://repositorio.usp.br/item/001769290>>

FUNASA - Fundação Nacional de Saúde. **Manual prático de análise de água**. 3. ed. Brasília: Fundação Nacional de Saúde, 2009. Disponível em: <http://www.funasa.gov.br/site/wp-content/files_mf/eng_analAgua.pdf>

GOMES, R. C.; BIANCHI, C.; DE OLIVEIRA, V. P. V. Análise da multidimensionalidade dos conceitos de bacia hidrográfica. **GEOgraphia**, v. 23, n. 51, 2021. Disponível em: <<https://periodicos.uff.br/geographia/article/view/27667/29889>>

GRASS Development Team. **Geographic Resources Analysis Support System (GRASS) Software**, Version 7.2. Open Source Geospatial Foundation, 2017. Disponível em: <<https://grass.osgeo.org/>>

GRIECO, A. A. et al. Diagnóstico espacial e temporal de condições físico-químicas e microbiológicas do Córrego do Tanquinho, Ribeirão Preto, SP, Brasil. **Revista Ambiente & Água**, v. 12, p. 282-298, 2017. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/ambiagua/a/wKKtxXWQqJ8nHdR6vnygfjv/abstract/?lang=pt>>

HOLOPAINEN, S.; LEHIKONEN, A. Role of forest ditching and agriculture on water quality: Connecting the long-term physico-chemical subsurface state of lakes with landscape and habitat structure information. **Science of The Total Environment**, v. 806, p. 151477, 2022. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969721065554>>

IGAM - Instituto Mineiro de Gestão das Águas. **Avaliação da qualidade das águas superficiais de Minas Gerais em 2018: resumo executivo anual**. Instituto Mineiro de Gestão das Águas. Belo Horizonte: Igam, 2019. Disponível em: <<http://200.198.57.118:8080/handle/123456789/3209>>

JUNG, M. LecoS—A python plugin for automated landscape ecology analysis. **Ecological informatics**, v. 31, p. 18-21, 2016. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1574954115001879>>

KAUSHAL, S. S. et al. Freshwater salinization syndrome on a continental scale. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 115, n. 4, p. E574-E583, 2018. Disponível em: <<https://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.1711234115>>

Landsat-9. Imagens LC09_L2SP_221079_20220612_20220614_02_T1_SR, cortesia do Serviço Geológico dos EUA (**U.S. Geological Survey**). 2022. Disponível em: <<https://earthexplorer.usgs.gov/>>

LUNARDI NETO, A. et al. **Estudos socioambientais sobre o Planalto Catarinense**. Florianópolis: Editora Insular, 2020. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/209445>>

MAGALHÃES JÚNIOR, H.; LOPES, F. A.; MACEDO, D. R.. Diagnóstico multitemporal do uso e cobertura da terra e qualidade das águas na bacia do rio Jequitinhonha em Minas Gerais como subsídio à gestão dos recursos hídricos superficiais. **Revista Espinhaço**, 2019. Disponível em: <<http://www.revistaespinhaco.com/index.php/revista/article/view/152/155>>

NAGELKERKE, N. J. D. et al. A note on a general definition of the coefficient of determination. **Biometrika**, v. 78, n. 3, p. 691-692, 1991. Disponível em: <<https://www.jstor.org/stable/2337038>>

NEDD, R. et al. A synthesis of land use/land cover studies: Definitions, classification systems, meta-studies, challenges and knowledge gaps on a global landscape. **Land**, v. 10, n. 9, p. 994, 2021. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2073-445X/10/9/994/htm#B54-land-10-00994>>

PARANHOS FILHO, A. C. et al. **Geotecnologias para aplicações ambientais**. 1. ed. [s.l.]: Uniedusul Editora, 2021. Disponível em: <<https://www.uniedusul.com.br/publicacao/geotecnologias-para-aplicacoes-ambientais/>>

PEREIRA, M. A. F.; BARBIEIRO, B. L.; QUEVEDO, D. M. Importância do monitoramento e disponibilização de dados hidrológicos para a gestão integrada dos recursos hídricos. **Sociedade & Natureza**, v. 32, p. 292-303, 2022. Disponível em: <<https://seer.ufu.br/index.php/sociedadennatureza/article/view/43458/28846>>

POERSCH, A. C. C. **Demanda bioquímica de oxigênio: aspectos históricos, metodológicos, climatológicos e socioeconômicos**. 2021. 44 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, 2021. Disponível em: <<https://tede.unioeste.br/handle/tede/5574>>

R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. **R Foundation for Statistical Computing**, Vienna, Austria, 2022. Disponível em: <<https://www.R-project.org/>>
RIEBESELL, Janosh. **Random Forest**. Graphics with TikZ in LaTeX. 2021. Disponível em: <<https://tikz.net/random-forest/>>

SAMUEL, A. L. Some studies in machine learning using the game of checkers. **IBM Journal of research and development**, v. 44, n. 1.2, p. 206-226, 2000. Disponível em: <<https://sci-hub.se/10.1147/rd.441.0206>>

SANTOS, A. C. D.; CORDEIRO, F. S.; VIEIRA, E. Aplicação das ferramentas de geoprocessamento na análise da ocupação do solo e sua interação com a qualidade da água por métodos estatísticos da sub bacia Suaçuí Grande, MG. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 12, n. 8, p. 241-258, 2021. Disponível em: <<http://www.sustenere.co/index.php/rica/article/view/6071/3160>>

SENRA, J. B.; NASCIMENTO, N. O. Após 20 anos da lei das águas como anda a Gestão Integrada de Recursos Hídricos do Brasil, no âmbito das Políticas e Planos Nacionais Setoriais. **REGA**, v. 14, n. 6, 2017. Disponível em: <https://abrh.s3.sa-east-1.amazonaws.com/Sumarios/198/024d6eb2b3f6b850a08f7d0900024ff4_e1d2425bd9a6dbfe9eb79212be893e1f.pdf>

SHETTY, S. **Analysis of machine learning classifiers for LULC classification on Google Earth engine**. 2019. Dissertação (Mestrado em Ciência da Geoinformação e Observação da Terra) - Universidade de Twente, Utah, EUA, 2019. Disponível em: <<http://essay.utwente.nl/83543/1/shetty.pdf>>

SIMEDO, M. B. L. et al. Effect of watershed land use on water quality: a case study in Córrego da Olaria Basin, São Paulo State, Brazil. **Brazilian Journal of Biology**, v. 78, p. 625-635, 2018. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/bjb/a/wW6kFfc6QdyW8MBYxsmWkdw/?lang=en#>>

SMITH, L. I. **A tutorial on principal components analysis**. Technical Report Department of Computer Science, University of Otago, 2002. Disponível em: <<https://ourarchive.otago.ac.nz/bitstream/handle/10523/7534/OUCS-2002-12.pdf>>

SOUZA JR, C. M. et al. Reconstructing three decades of land use and land cover changes in brazilian biomes with landsat archive and earth engine. **Remote Sensing**, v. 12, n. 17, p. 2735, 2020. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2072-4292/12/17/2735/htm>>

TALUKDAR, S. et al. Land-use land-cover classification by machine learning classifiers for satellite observations—A review. **Remote Sensing**, v. 12, n. 7, p. 1135, 2020. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2072-4292/12/7/1135/htm>>

TANIWAKI, R. H. et al. Impacts of converting low-intensity pastureland to high-intensity bioenergy cropland on the water quality of tropical streams in Brazil. **Science of the Total Environment**, v. 584, p. 339-347, 2017. Disponível em: <<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28040217/>>

TEN CATEN, A.; SAFANELLI, J. L.; RUIZ, L. F. C. Mapeamento multitemporal da cobertura de terra, por meio de árvore de decisão, na bacia hidrográfica do rio Marombas-SC. **Engenharia Agrícola**, v. 35, p. 1198-1209, 2015. Disponível em:
<<https://www.scielo.br/j/eagri/a/gFNwX5CTMjYZ8DQ9BkC5WmG/?lang=pt>>

UMWALI, E. D. et al. Spatio-seasonal variation of water quality influenced by land use and land cover in Lake Muhazi. **Scientific Reports**, v. 11, n. 1, p. 1-16, 2021. Disponível em:
<<https://www.nature.com/articles/s41598-021-96633-9#Sec21>>

UNESCO. **The United Nations World Water Development Report 2019: Leaving No One behind**. UNESCO, Paris, 2019. Disponível em:
<<https://www.unwater.org/publications/world-water-development-report-2019/>>

UNESCO. **The United Nations World Water Development Report 2021: Valuing Water**. UNESCO, Paris, 2021. Disponível em:
<<https://www.unwater.org/publications/un-world-water-development-report-2021/>>

UNESCO. **The United Nations World Water Development Report 2022. GROUNDWATER: Making the invisible visible**. UNESCO, Paris, 2022. Disponível em:
<<https://www.unwater.org/publications/groundwater-overview-making-invisible-visible>>

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 1996. Disponível em:
<https://www.academia.edu/39149408/Introdu%C3%A7%C3%A3o_%C3%A0_qualidade_da_s_%C3%A1guas_e_ao_tratamento_de_esgotos>

WAN, R. et al. Inferring land use and land cover impact on stream water quality using a Bayesian hierarchical modeling approach in the Xitiaoxi River Watershed, China. **Journal of Environmental Management**, v. 133, p. 1-11, 2014. Disponível em:
<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479713007287?via%3Dihub>>

WANG, X.; ZHANG, F. Multi-scale analysis of the relationship between landscape patterns and a water quality index (WQI) based on a stepwise linear regression (SLR) and geographically weighted regression (GWR) in the Ebinur Lake oasis. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 25, n. 7, p. 7033-7048, 2018. Disponível em:
<<https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-017-1041-8#Sec23>>

YU, Z. et al. Selection of landsat 8 OLI band combinations for land use and land cover classification. In: **2019 8th International Conference on Agro-Geoinformatics (Agro-Geoinformatics)**. IEEE, 2019. p. 1-5. Disponível em:
<<https://sci-hub.se/10.1109/agro-geoinformatics.2019.8820595>>

APÊNDICE A – Bloco de código em R com o programa para classificação via
Random Forest.

```
library(raster)
library(randomForest)
library(sf)
#processar bandas.
pathToFiles <- "C:/User/"
products <- list.files(pathToFiles, full.names = TRUE)

bands <- c(grep('B1', products, value=TRUE),
           grep('B2', products, value=TRUE),
           grep('B3', products, value=TRUE),
           grep('B4', products, value=TRUE),
           grep('B5', products, value=TRUE),
           grep('B6', products, value=TRUE),
           grep('B7', products, value=TRUE))

img <- stack(bands) #fundir as bandas.

#carregar os vetores de amostragem.
shp <- read_sf("training_dataREPROJ.shp")

shp <- shp[c(-425),] #um polígono ficou vazio.

compareCRS(img,shp) #mesmo SRC em ambos.

#visualização.
plotRGB(img, r = 4, g = 3, b = 2, stretch = "lin", colNA = 'white')
plot(shp, col="red", add=TRUE)

#conversão de classes em fatores.
levels(as.factor(shp$class))

for (i in 1:length(unique(shp$class)))
{cat(paste0(i, " ", levels(as.factor(shp$class))[i]), sep = "\n")}

#renomear as bandas. melhora a visualização.
names(img) <- c("B1", "B2", "B3", "B4", "B5", "B6", "B7")
names(img)

#extração de valores de reflectância. Leva um tempo!
smp <- raster::extract(img, shp, df = TRUE)
```

```

#combinar a coluna 'ID' da extração com a coluna 'class' dos
vetores.
smp$cl <- as.factor(shp$class[match(smp$ID, seq(nrow(shp)))])
smp <- smp[-1] #remover a coluna ID

#salvar o dataframe da amostragem.
save(smp, file = "smp.rda")
load(file = "smp.rda")

#visualização dos perfis espectrais das classes.
sp <- aggregate( . ~ cl, data = smp, FUN = mean, na.rm = TRUE )
graphics::plot(0,
  ylim = c(min(sp[2:ncol(sp)]), max(sp[2:ncol(sp)])),
  xlim = c(1, ncol(smp)-1),
  type = 'n',
  xlab = "Bandas Landsat",
  ylab = "Reflectância [% * 100]")

mycolors <- c("#E974ED", "#af2a2a", "#0000FF",
              "#006400", "#FFEF3", "#FFD966", "#935132")

for (i in 1:nrow(sp)){
  lines(as.numeric(sp[i, -1]),
        lwd = 4,
        col = mycolors[i])}

grid(col = "black")
legend(as.character(sp$cl),
       x = "topleft",
       col = mycolors,
       lwd = 5,
       bty = "n")

#avaliação da distribuição das amostras nas classes.
summary(smp$cl)

#sub-dimensionamento da amostra a partir da classe minoritária.
smp.size <- rep(min(summary(smp$cl)), nlevels(smp$cl))
smp.size

```

```
#modelagem.
rfmodel <- tuneRF(x = smp[-ncol(smp)],
                 y = smp$c1,
                 sampsize = smp.size,
                 strata = smp$c1,
                 ntree = 250,
                 importance = TRUE,
                 doBest = TRUE,
                 plot = TRUE)

#info do modelo.
rfmodel

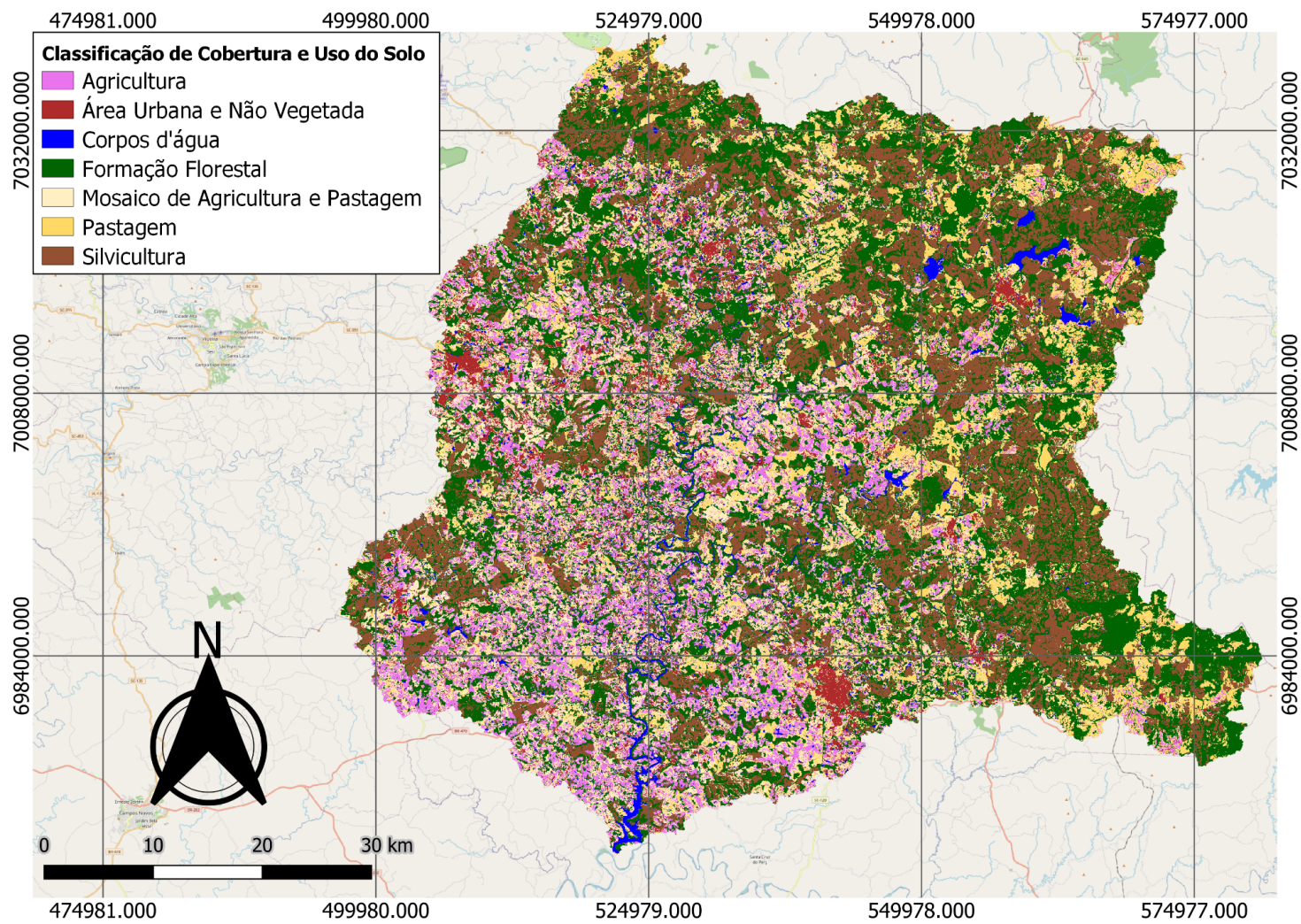
#importância das variáveis.
varImpPlot(rfmodel)

#plot do modelo.
plot(rfmodel, col = c("#000000", "#E974ED", "#af2a2a", "#0000FF",
                    "#006400", "#FFEF3", "#FFD966", "#935132"),
     lwd = 3)

#salvar modelo.
save(rfmodel, file = "rfmodel.RData")
load("rfmodel.RData")

#rodar classificação.
result <- raster::predict(img,
                          rfmodel,
                          filename = "RF_classification.tif",
                          overwrite = TRUE,
                          progress = "text")

#plotar classificação.
plot(result,
     axes = FALSE,
     box = FALSE,
     col = mycolors)
```

APÊNDICE B – Mapa Temático de cobertura e uso da terra produzido a partir da classificação RF (1:400.000).

Fonte: autor (2022).

APÊNDICE C – Detalhamento dos valores de qualidade (q_i) de cada parâmetro avaliado.

P1 - 08/11/2021

Parâmetro	Nomenclatura	Unidade	Resultados da análise de água	Peso w	qi	qi*w
Coliformes termotolerantes	CT	NMP/100mL	887	0,15	3,0	1,18
pH	pH	-	7,16	0,12	90,64	1,72
Demanda Bioquímica de Oxigênio	DBO	mg/L	1,90	0,10	82,32	1,55
Nitratos	NTT	mg/L NO ₃	0,29	0,10	98,69	1,58
Fosfato Total	FFT	mg/L PO ₄	0,29	0,10	70,69	1,53
Temperatura	Temp	°C	19,30	0,10	92,00	1,57
Turbidez	Turb	NTU	15,97	0,08	67,41	1,40
Sólidos Totais	STT	mg/L	41,30	0,08	86,51	1,43
Oxigênio Dissolvido	OD	mg/L	7,9	0,17	89,51	2,15
Altitude	Elev	m	860,0			
				% IQA =	51,502	
				Classe:	Médio	

P1 - 07/02/2022

Parâmetro	Nomenclatura	Unidade	Resultados da análise de água	Peso w	qi	qi*w
Coliformes termotolerantes	CT	NMP/100mL	745	0,15	3,0	1,18
pH	pH	-	7,04	0,12	91,89	1,72
Demanda Bioquímica de Oxigênio	DBO	mg/L	1,80	0,10	83,22	1,56
Nitratos	NTT	mg/L NO ₃	0,26	0,10	98,84	1,58
Fosfato Total	FFT	mg/L PO ₄	0,29	0,10	70,94	1,53
Temperatura	Temp	°C	21,10	0,10	92,00	1,57
Turbidez	Turb	NTU	15,47	0,08	68,05	1,40
Sólidos Totais	STT	mg/L	36,67	0,08	86,24	1,43
Oxigênio Dissolvido	OD	mg/L	7,5	0,17	88,12	2,14
Altitude	Elev	m	860,0			
				% IQA =	51,558	
				Classe:	Médio	

P1 - 09/05/2022

Parâmetro	Nomenclatura	Unidade	Resultados da análise de água	Peso w	qi	qi*w
Coliformes termotolerantes	CT	NMP/100mL	215	0,15	3,0	1,18
pH	pH	-	6,21	0,12	60,79	1,64
Demanda Bioquímica de Oxigênio	DBO	mg/L	2,00	0,10	81,43	1,55
Nitratos	NTT	mg/L NO ₃	1,46	0,10	92,72	1,57
Fosfato Total	FFT	mg/L PO ₄	0,71	0,10	48,98	1,48
Temperatura	Temp	°C	14,40	0,10	92,00	1,57
Turbidez	Turb	NTU	14,17	0,08	69,78	1,40
Sólidos Totais	STT	mg/L	94,70	0,08	85,20	1,43
Oxigênio Dissolvido	OD	mg/L	8,9	0,17	90,95	2,15
Altitude	Elev	m	860,0			
				% IQA =	47,177	
				Classe:	Ruim	

P1 - 13/08/2022

Parâmetro	Nomenclatura	Unidade	Resultados da análise de água	Peso w	qi	qi*w
Coliformes termotolerantes	CT	NMP/100mL	673	0,15	3,0	1,18
pH	pH	-	7,20	0,12	91,31	1,72
Demanda Bioquímica de Oxigênio	DBO	mg/L	2,00	0,10	81,43	1,55
Nitratos	NTT	mg/L NO ₃	1,17	0,10	94,20	1,58
Fosfato Total	FFT	mg/L PO ₄	0,36	0,10	66,07	1,52
Temperatura	Temp	°C	12,00	0,10	92,00	1,57
Turbidez	Turb	NTU	13,97	0,08	70,06	1,40
Sólidos Totais	STT	mg/L	32,00	0,08	85,88	1,43
Oxigênio Dissolvido	OD	mg/L	9,0	0,17	87,73	2,14
Altitude	Elev	m	860,0			
				% IQA =	50,860	
				Classe:	Médio	

P2 - 08/11/2022

Parâmetro	Nomenclatura	Unidade	Resultados da análise de água	Peso w	qi	qi*w	
Coliformes termotolerantes	CT	NMP/100mL	103	0,15	39,84	1,74	
pH	pH	-	7,34	0,12	92,79	1,72	
Demanda Bioquímica de Oxigênio	DBO	mg/L	4,40	0,10	62,50	1,51	
Nitratos	NTT	mg/L NO ₃	4,06	0,10	79,46	1,55	
Fosfato Total	FFT	mg/L PO ₄	0,32	0,10	68,72	1,53	
Temperatura	Temp	°C	18,60	0,10	92,00	1,57	
Turbidez	Turb	NTU	27,00	0,08	55,00	1,38	
Sólidos Totais	STT	mg/L	64,70	0,08	86,75	1,43	
Oxigênio Dissolvido	OD	mg/L	7,2	0,17	81,11	2,11	
Altitude	Elev	m	865,0				
						% IQA =	69,932
						Classe:	Médio

P2 - 07/02/2022

Parâmetro	Nomenclatura	Unidade	Resultados da análise de água	Peso w	qi	qi*w	
Coliformes termotolerantes	CT	NMP/100mL	830	0,15	3,0	1,18	
pH	pH	-	7,52	0,12	92,90	1,72	
Demanda Bioquímica de Oxigênio	DBO	mg/L	1,20	0,10	88,80	1,57	
Nitratos	NTT	mg/L NO ₃	3,75	0,10	81,05	1,55	
Fosfato Total	FFT	mg/L PO ₄	0,84	0,10	44,33	1,46	
Temperatura	Temp	°C	19,20	0,10	92,00	1,57	
Turbidez	Turb	NTU	38,67	0,08	44,89	1,36	
Sólidos Totais	STT	mg/L	77,33	0,08	86,28	1,43	
Oxigênio Dissolvido	OD	mg/L	6,4	0,17	72,60	2,07	
Altitude	Elev	m	865,0				
						% IQA =	45,489
						Classe:	Ruim

P2 - 09/05/2022

Parâmetro	Nomenclatura	Unidade	Resultados da análise de água	Peso w	qi	qi*w	
Coliformes termotolerantes	CT	NMP/100mL	517	0,15	3,0	1,18	
pH	pH	-	6,73	0,12	83,37	1,70	
Demanda Bioquímica de Oxigênio	DBO	mg/L	1,70	0,10	84,12	1,56	
Nitratos	NTT	mg/L NO ₃	2,57	0,10	87,06	1,56	
Fosfato Total	FFT	mg/L PO ₄	1,24	0,10	34,69	1,43	
Temperatura	Temp	°C	14,57	0,10	92,00	1,57	
Turbidez	Turb	NTU	41,00	0,08	43,18	1,35	
Sólidos Totais	STT	mg/L	76,00	0,08	86,35	1,43	
Oxigênio Dissolvido	OD	mg/L	7,9	0,17	81,89	2,11	
Altitude	Elev	m	865,0				
						% IQA =	44,662
						Classe:	Ruim

P2 - 13/08/2022

Parâmetro	Nomenclatura	Unidade	Resultados da análise de água	Peso w	qi	qi*w	
Coliformes termotolerantes	CT	NMP/100mL	1100	0,15	3,0	1,18	
pH	pH	-	7,75	0,12	90,58	1,72	
Demanda Bioquímica de Oxigênio	DBO	mg/L	1,60	0,10	85,04	1,56	
Nitratos	NTT	mg/L NO ₃	0,78	0,10	96,19	1,58	
Fosfato Total	FFT	mg/L PO ₄	0,29	0,10	70,69	1,53	
Temperatura	Temp	°C	13,17	0,10	92,00	1,57	
Turbidez	Turb	NTU	27,67	0,08	54,35	1,38	
Sólidos Totais	STT	mg/L	46,70	0,08	86,72	1,43	
Oxigênio Dissolvido	OD	mg/L	8,1	0,17	81,46	2,11	
Altitude	Elev	m	865,0				
						% IQA =	49,858
						Classe:	Ruim

P3 - 08/11/2021

Parâmetro	Nomenclatura	Unidade	Resultados da análise de água	Peso w	qi	qi*w
Coliformes termotolerantes	CT	NMP/100mL	33	0,15	52,03	1,81
pH	pH	-	7,25	0,12	91,99	1,72
Demanda Bioquímica de Oxigênio	DBO	mg/L	1,40	0,10	86,90	1,56
Nitratos	NTT	mg/L NO ₃	0,77	0,10	96,24	1,58
Fosfato Total	FFT	mg/L PO ₄	0,42	0,10	62,18	1,51
Temperatura	Temp	°C	21,00	0,10	92,00	1,57
Turbidez	Turb	NTU	11,30	0,08	73,89	1,41
Sólidos Totais	STT	mg/L	38,00	0,08	86,33	1,43
Oxigênio Dissolvido	OD	mg/L	7,6	0,17	89,01	2,14
Altitude	Elev	m	866,0			
				% IQA =	78,860	
				Classe:	Bom	

P3 - 07/02/2022

Parâmetro	Nomenclatura	Unidade	Resultados da análise de água	Peso w	qi	qi*w
Coliformes termotolerantes	CT	NMP/100mL	1100	0,15	3,0	1,18
pH	pH	-	7,43	0,12	93,08	1,72
Demanda Bioquímica de Oxigênio	DBO	mg/L	1,40	0,10	86,90	1,56
Nitratos	NTT	mg/L NO ₃	0,20	0,10	99,15	1,58
Fosfato Total	FFT	mg/L PO ₄	0,21	0,10	76,65	1,54
Temperatura	Temp	°C	22,00	0,10	92,00	1,57
Turbidez	Turb	NTU	19,43	0,08	63,16	1,39
Sólidos Totais	STT	mg/L	35,33	0,08	86,15	1,43
Oxigênio Dissolvido	OD	mg/L	7,1	0,17	85,09	2,13
Altitude	Elev	m	866,0			
				% IQA =	51,657	
				Classe:	Médio	

P3 - 09/05/2022

Parâmetro	Nomenclatura	Unidade	Resultados da análise de água	Peso w	qi	qi*w
Coliformes termotolerantes	CT	NMP/100mL	152	0,15	3,0	1,18
pH	pH	-	6,92	0,12	89,43	1,71
Demanda Bioquímica de Oxigênio	DBO	mg/L	2,20	0,10	79,67	1,55
Nitratos	NTT	mg/L NO ₃	1,11	0,10	94,51	1,58
Fosfato Total	FFT	mg/L PO ₄	0,34	0,10	67,13	1,52
Temperatura	Temp	°C	15,20	0,10	92,00	1,57
Turbidez	Turb	NTU	14,10	0,08	69,88	1,40
Sólidos Totais	STT	mg/L	33,50	0,08	86,00	1,43
Oxigênio Dissolvido	OD	mg/L	8,8	0,17	91,39	2,15
Altitude	Elev	m	866,0			
				% IQA =	51,069	
				Classe:	Médio	

P3 - 13/08/2022

Parâmetro	Nomenclatura	Unidade	Resultados da análise de água	Peso w	qi	qi*w
Coliformes termotolerantes	CT	NMP/100mL	570	0,15	3,0	1,18
pH	pH	-	7,18	0,12	90,99	1,72
Demanda Bioquímica de Oxigênio	DBO	mg/L	1,80	0,10	83,22	1,56
Nitratos	NTT	mg/L NO ₃	0,22	0,10	99,05	1,58
Fosfato Total	FFT	mg/L PO ₄	0,00	0,10	99,99	1,58
Temperatura	Temp	°C	13,03	0,10	92,00	1,57
Turbidez	Turb	NTU	18,47	0,08	64,30	1,40
Sólidos Totais	STT	mg/L	40,00	0,08	86,45	1,43
Oxigênio Dissolvido	OD	mg/L	8,7	0,17	86,88	2,14
Altitude	Elev	m	866,0			
				% IQA =	52,947	
				Classe:	Médio	

P4 - 08/11/2021

Parâmetro	Nomenclatura	Unidade	Resultados da análise de água	Peso w	qi	qi*w
Coliformes termotolerantes	CT	NMP/100mL	57	0,15	45,87	1,78
pH	pH	-	7,72	0,12	91,02	1,72
Demanda Bioquímica de Oxigênio	DBO	mg/L	2,70	0,10	75,43	1,54
Nitratos	NTT	mg/L NO ₃	1,36	0,10	93,23	1,57
Fosfato Total	FFT	mg/L PO ₄	0,28	0,10	71,72	1,53
Temperatura	Temp	°C	22,83	0,10	92,00	1,57
Turbidez	Turb	NTU	17,13	0,08	65,94	1,40
Sólidos Totais	STT	mg/L	30,70	0,08	85,76	1,43
Oxigênio Dissolvido	OD	mg/L	8,4	0,17	97,96	2,18
Altitude	Elev	m	814,0			
				% IQA =	77,563	
				Classe:	Bom	

P4 - 07/02/2022

Parâmetro	Nomenclatura	Unidade	Resultados da análise de água	Peso w	qi	qi*w
Coliformes termotolerantes	CT	NMP/100mL	733	0,15	3,0	1,18
pH	pH	-	7,52	0,12	92,90	1,72
Demanda Bioquímica de Oxigênio	DBO	mg/L	2,20	0,10	79,67	1,55
Nitratos	NTT	mg/L NO ₃	0,50	0,10	97,62	1,58
Fosfato Total	FFT	mg/L PO ₄	0,79	0,10	46,07	1,47
Temperatura	Temp	°C	23,47	0,10	92,00	1,57
Turbidez	Turb	NTU	68,00	0,08	28,68	1,31
Sólidos Totais	STT	mg/L	84,67	0,08	85,88	1,43
Oxigênio Dissolvido	OD	mg/L	7,6	0,17	92,39	2,16
Altitude	Elev	m	814,0			
				% IQA =	46,239	
				Classe:	Ruim	

P4 - 09/05/2022

Parâmetro	Nomenclatura	Unidade	Resultados da análise de água	Peso w	qi	qi*w
Coliformes termotolerantes	CT	NMP/100mL	617	0,15	3,0	1,18
pH	pH	-	7,01	0,12	91,49	1,72
Demanda Bioquímica de Oxigênio	DBO	mg/L	2,20	0,10	79,67	1,55
Nitratos	NTT	mg/L NO ₃	0,68	0,10	96,70	1,58
Fosfato Total	FFT	mg/L PO ₄	0,71	0,10	48,76	1,48
Temperatura	Temp	°C	15,33	0,10	92,00	1,57
Turbidez	Turb	NTU	31,33	0,08	50,93	1,37
Sólidos Totais	STT	mg/L	78,00	0,08	86,25	1,43
Oxigênio Dissolvido	OD	mg/L	8,7	0,17	90,75	2,15
Altitude	Elev	m	814,0			
				% IQA =	48,422	
				Classe:	Ruim	

P4 - 13/08/2022

Parâmetro	Nomenclatura	Unidade	Resultados da análise de água	Peso w	qi	qi*w
Coliformes termotolerantes	CT	NMP/100mL	520	0,15	3,0	1,18
pH	pH	-	7,37	0,12	92,94	1,72
Demanda Bioquímica de Oxigênio	DBO	mg/L	2,30	0,10	78,81	1,55
Nitratos	NTT	mg/L NO ₃	0,64	0,10	96,91	1,58
Fosfato Total	FFT	mg/L PO ₄	0,17	0,10	80,89	1,55
Temperatura	Temp	°C	13,50	0,10	92,00	1,57
Turbidez	Turb	NTU	47,67	0,08	38,78	1,34
Sólidos Totais	STT	mg/L	64,00	0,08	86,76	1,43
Oxigênio Dissolvido	OD	mg/L	9,2	0,17	91,96	2,16
Altitude	Elev	m	814,0			
				% IQA =	50,024	
				Classe:	Médio	

P5 - 08/11/2021

Parâmetro	Nomenclatura	Unidade	Resultados da análise de água	Peso w	qi	qi*w	
Coliformes termotolerantes	CT	NMP/100mL	125	0,15	3,0	1,18	
pH	pH	-	7,57	0,12	92,62	1,72	
Demanda Bioquímica de Oxigênio	DBO	mg/L	1,00	0,10	90,73	1,57	
Nitratos	NTT	mg/L NO ₃	1,41	0,10	92,98	1,57	
Fosfato Total	FFT	mg/L PO ₄	0,25	0,10	73,30	1,54	
Temperatura	Temp	°C	22,40	0,10	92,00	1,57	
Turbidez	Turb	NTU	12,17	0,08	72,60	1,41	
Sólidos Totais	STT	mg/L	26,00	0,08	85,25	1,43	
Oxigênio Dissolvido	OD	mg/L	7,4	0,17	88,98	2,14	
Altitude	Elev	m	766,0				
						% IQA =	52,214
						Classe:	Médio

P5 - 07/02/2022

Parâmetro	Nomenclatura	Unidade	Resultados da análise de água	Peso w	qi	qi*w	
Coliformes termotolerantes	CT	NMP/100mL	813	0,15	3,0	1,18	
pH	pH	-	7,55	0,12	92,75	1,72	
Demanda Bioquímica de Oxigênio	DBO	mg/L	1,80	0,10	83,22	1,56	
Nitratos	NTT	mg/L NO ₃	0,80	0,10	96,09	1,58	
Fosfato Total	FFT	mg/L PO ₄	0,81	0,10	45,41	1,46	
Temperatura	Temp	°C	25,13	0,10	92,00	1,57	
Turbidez	Turb	NTU	42,00	0,08	42,48	1,35	
Sólidos Totais	STT	mg/L	62,00	0,08	86,80	1,43	
Oxigênio Dissolvido	OD	mg/L	7,0	0,17	88,37	2,14	
Altitude	Elev	m	766,0				
						% IQA =	47,450
						Classe:	Ruim

P5 - 09/05/2022

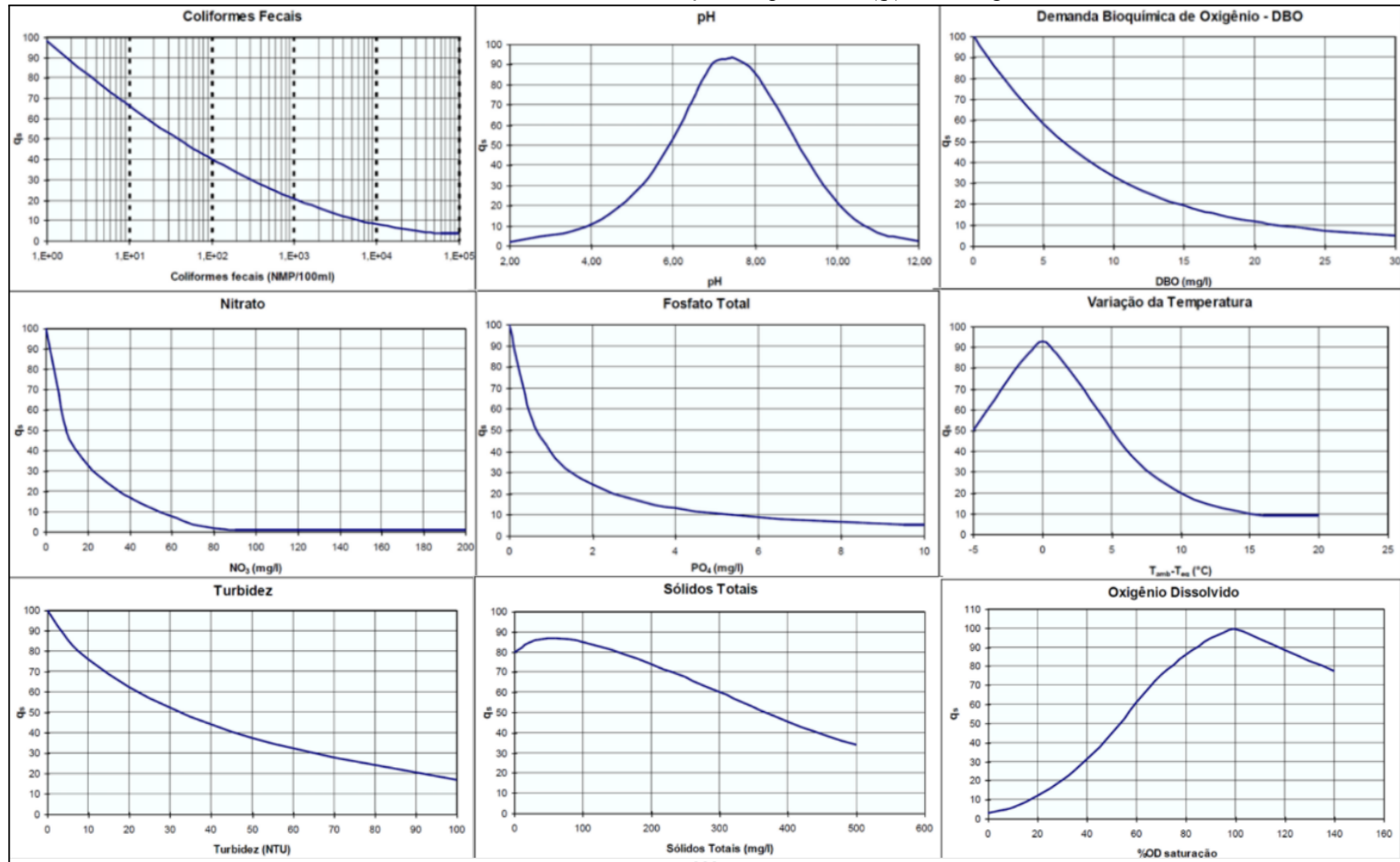
Parâmetro	Nomenclatura	Unidade	Resultados da análise de água	Peso w	qi	qi*w	
Coliformes termotolerantes	CT	NMP/100mL	745	0,15	3,0	1,18	
pH	pH	-	6,98	0,12	90,95	1,72	
Demanda Bioquímica de Oxigênio	DBO	mg/L	2,40	0,10	77,95	1,55	
Nitratos	NTT	mg/L NO ₃	0,57	0,10	97,26	1,58	
Fosfato Total	FFT	mg/L PO ₄	1,18	0,10	35,89	1,43	
Temperatura	Temp	°C	16,73	0,10	92,00	1,57	
Turbidez	Turb	NTU	26,00	0,08	56,00	1,38	
Sólidos Totais	STT	mg/L	30,00	0,08	85,69	1,43	
Oxigênio Dissolvido	OD	mg/L	8,3	0,17	89,40	2,15	
Altitude	Elev	m	766,0				
						% IQA =	47,064
						Classe:	Ruim

P5 - 13/08/2022

Parâmetro	Nomenclatura	Unidade	Resultados da análise de água	Peso w	qi	qi*w	
Coliformes termotolerantes	CT	NMP/100mL	570	0,15	3,0	1,18	
pH	pH	-	7,42	0,12	93,07	1,72	
Demanda Bioquímica de Oxigênio	DBO	mg/L	3,30	0,10	70,61	1,53	
Nitratos	NTT	mg/L NO ₃	0,53	0,10	97,47	1,58	
Fosfato Total	FFT	mg/L PO ₄	0,15	0,10	82,86	1,56	
Temperatura	Temp	°C	14,03	0,10	92,00	1,57	
Turbidez	Turb	NTU	45,67	0,08	40,03	1,34	
Sólidos Totais	STT	mg/L	56,00	0,08	86,85	1,43	
Oxigênio Dissolvido	OD	mg/L	9,7	0,17	96,29	2,17	
Altitude	Elev	m	766,0				
						% IQA =	50,155
						Classe:	Médio

Fonte: autor (2022)

ANEXO A – Curvas médias da variação da qualidade (q_i) de cada parâmetro.



Fonte: IGAM (2019).